DIE INNERE WÄRMELEITUNGSFÄHIGKEIT VON BODENARTEN BEI VERSCHIEDENEM FEUCHTIGKEITSGEHALT

INAUGURAL-DISSERTATION

MIT GENEHMIGUNG DER MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHEN SEKTION DER PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT ZU UPSALA ZUR ÖFFENTLICHEN BEURTEILUNG VORGELEGT

VON

CARL MUNTHE
LIC. PHIL., NORRL.

DIE VERTEIDIGUNG WIRD AM 13 NOV. 1915 UM 10 UHR VORMITTAGS IM HÖRSAAL DES PHYSIKALISCHEN INSTITUTES STATTFINDEN

UPPSALA 1915
K. W. APPELBERGS BOKTRYCKERI

DIE INNERE WÄRMELEITUNGSFÄHIGKEIT VON BODENARTEN BEI VERSCHIEDENEM FEUCHTIGKEITSGEHALT

INAUGURAL-DISSERTATION

MIT GENEHMIGUNG DER MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHEN SEKTION DER PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT ZU UPSALA ZUR ÖFFENTLICHEN BEURTEILUNG VORGELEGT

VON

CARL MUNTHE
LIC. PHIL., NORRL.

DIE VERTEIDIGUNG WIRD AM 13 NOV. 1915 UM 10 UHR VORMITTAGS IM HÖRSAAL DES PHYSIKALISCHEN INSTITUTES STATTFINDEN

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

UPPSALA 1915
K. W. APPELBERGS BOKTRYCKERI

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41523708_0037

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Geschichtliches 1

I. **Über die Theorie der Methode** 10

II. **Versuchsanordnungen.**

A. Wärmeleitungsversuch 17

B. Kalorimeterversuch 22

III. **Die allgemeine Behandlungsweise der Bodenarten** 24

IV. **Die experimentellen Engebnisse.**

1. Vorbereitende Versuche 28
2. Rechenbeispiel 29
3. *107 Sandbäck* 37
4. *235 Sandbäckshult* 38
5. *117 Kosta* 39
6. *381 Ekerum* 40
7. *123 Svedala* 42
8. *Torestorpsmossen* 43
9. *Flahult* 44

V. **Fehlerquellen und Korrektionen.**

1. Der Packungsgrad S. 46. 2. Die Glasstützen 46
3. Die u-Korrektion S. 47. 4. Das Thermoelement 47
5. Die Latenzzeit des Galvanometers S. 47. 6. Das Gummiisolierband 50
7. Spätere Wasserversuche S. 52. 8. Lorberg's Korrektionen 52
9. Die Genauigkeit und die Fehlergrenzen 54

VI. **Diskussion der Ergebnisse. Kritik. Schlussfolgerungen.**

1. Allgemeines über die Ergebnisse. S. 57. 2. Abweichungen ... 60
3. Kritik der Untersuchungen Karsten's 61
4. Der Temperaturkoeffizient für die Wärmeleitungsfähigkeit feuchter Bodenarten 62
5. Theoretisches 63
6. Die Eigenschaften feuchter Bodenarten in anderen Hinsichten ... 70
7. Schlussfolgerungen 73

Zusammenfassung 75

Bezeichnungen 77

VORWORT.

Die vorliegende Arbeit ist eine Erweiterung meiner Abhandlung: "Undersökning af olika jordarters ledningsförmåga för värme vid olika fuktighetshalt", die im Januar ds. Js. zum Wettbewerb um den Linnépreis der Kgl. Societät der Wissenschaften in Upsala eingereicht wurde.

Die Erweiterung besteht in einer Vermehrung des Untersuchungsmaterials von vier auf sieben Bodenarten; nach der qualitativen Seite hin haben einige bestimmtere Schlussfolgerungen gezogen werden können betreffs der recht merkwürdigen und charakteristischen Äusserungen der Wärmeleitungsfähigkeit angefeuchteter pulverförmiger Stoffe, wie sie die Untersuchung als Resultat ergeben hat.

Da der Gegenstand zweifellos andere Wissenschaftsgebiete, Meteorologie, Geologie, Agrikulturchemie und Bodenkunde, berührt, so sei von vornherein betont, dass die Untersuchung soweit als möglich ausschliesslich auf physikalische Grundlage gestellt worden ist und physikalische Schlussfolgerungen ergeben hat. Demgemäss sind in der geschichtlichen Übersicht eine ganze Reihe den Gegenstand in weiterem Sinne berührender Aufsätze und Abhandlungen, die aber einer speziell physikalischen Bedeutung ermangeln, unberücksichtigt geblieben.

Das Untersuchungsmaterial, das aus schwedischen, typischen Bodenarten bestanden hat, ist mir in wohlwollender Weise nebst Analysen von Herrn Dr. phil. A. Atterberg an der Chemischen Versuchsstation des Schwedischen Staates in Kalmar (die 5 ersten Bodenarten) und von dem Direktor des Schwedischen Moorkulturvereins Herrn Dr. phil. H. v. Feilitzen in Jönköping zur Verfügung gestellt worden, wofür ich den beiden Herren hier meinen ergebenen Dank ausspreche.

In dem Kapitel über die Theorie der angewandten Methode habe ich dieselbe einigermassen ausführlich behandelt, um dem Leser das Verständnis der Bezeichnungen und eine etwaige Kontrolle der Berechnungen, die ich nach einem bestimmten System geordnet habe, zu erleichtern.

Zur Veranschaulichung gebe ich **eine** *der Berechnungen in vollständiger Ausführung.*

Die vorliegende Untersuchung ist im Physikalischen Institut in Upsala in der zweiten Hälfte des Frühlingssemesters 1914 sowie im Herbstsemester desselben Jahres und des Frühlingssemesters 1915 ausgeführt worden.

Dem Vorstander des Instituts, Herrn Professor Dr. G. Granqvist, erlaube ich mir sowohl für die Anregung zu der Arbeit als auch für wertvolle Ratschläge im Laufe derselben und für die Bereitwilligkeit, mit der er die erforderlichen Apparate zu meiner Verfügung gestellt hat, meinen aufrichtigen Dank zu bezeugen.

Upsala, im September 1915.

Carl Munthe.

Geschichtliches.

Über die Frage der Wärmeleitungsfähigkeit pulverförmiger Körper und insbesondere der Wärmeleitungsfähigkeit natürlicher Bodenarten bei variierendem Feuchtigkeitsgehalt liegen bisher verhältnismässig wenige Untersuchungen vor.

Der erste, der diese Frage zum Gegenstand systematischen und physikalischen Studiums machte, dürfte wohl v. LITTROW[1] sein, der sie in einer Inauguraldissertation in Halle 1875 behandelte. Er bediente sich der klassischen Despretz'schen Säulemethode (später etwas von WIEDEMANN modifiziert). In einen senkrechten Zylinder wird die Probe eingeschlossen, die Wärmequelle befindet sich oben, und 4 horizontale Thermometer werden mit ihren Kugeln in der Achse des Zylinders in gleichen Abstand von einander, angebracht. Das Material bestand aus 17 einigermassen definierten deutschen Bodenarten, die trocken untersucht wurden, (ferner Wasser und Luft) und endlich 8 von den erstgenannten Bodenarten, die mit Wasser ungefähr gesättigt waren. Feuchtigkeitsgrade zwischen trocken und nass kamen nicht zur Untersuchung, ausser in einem einzigen Falle: "luftfeucht". Die Resultate waren relative und ausschliesslich qualitative; der Verfasser ordnet nur die Stoffe in Reihen nach abnehmender Wärmeleitungsfähigkeit, einer "trockenen Reihe" und einer "nassen Reihe". Ausser weitläufigen Ablesungsprotokollen werden keinerlei Zahlen geboten. Aus diesen Protokollen könnte man indessen absolute Werte berechnen, was jedoch nur die Mühe lohnen würde, wenn mehr Feuchtigkeitsgrade in die Untersuchung einbezogen worden wären. Betreffs der Ergebnisse erwähnt der Verfasser u. a.:

[1] A. v. LITTROW, Über die relative Wärmeleitungsfähigkeit verschiedener Bodenarten und den betreffenden Einfluss des Wassers. Ber. d. Akad. d. Wiss. Wien. **71**. 99. 1875.

1. "Den Haupteinfluss auf die Wärmeleitungsfähigkeit eines *trockenen Bodens* übt seine mechanische Zusammensetzung. Mit dem Steigen der Feinheit seiner Konstitution nimmt seine Wärmeleitungsfähigkeit ab. — — —"

3. "Wasser leitet die Wärme mehr als selbst der bestleitende der untersuchten Böden, und erhöht die Fähigkeit derselben, Wärme zu leiten, schon bei geringen Feuchtigkeitsgraden. — — —"

4. "Demnach leiten *nasse Böden*, in deren Zwischenräumen der schlechte Leiter: Luft durch den besseren Leiter: Wasser ersetzt ist, die Wärme besser als trockene, und durch den Versuch wurde konstatiert, dass die meisten Böden dieselbe auch besser als Wasser leiten; folglich ist dadurch auch festgestellt, dass die den Boden bildenden Materialien, vielleicht mit Ausnahme von sehr leichtem Humus, bessere Leiter sind als Wasser. — — —"

Ferner kann ich nicht unterlassen, in grösster Kürze eine sehr verdienstliche Arbeit überwiegend meteorologischer Natur von Th. Homén[1] über Erdtemperaturbeobachtungen in verschiedener Tiefe und zu verschiedenen Tageszeiten, die hauptsächlich 1893 in Finnland angestellt worden sind, zu erwähnen. Bei diesen sorgfältig ausgeführten Beobachtungen im Freien hat der Verfasser mittelst A. J. Ångström's Methode mit variablem Temperaturzustand die Wärmeleitungsfähigkeit einiger Bodenarten unter der Annahme eines mittleren Wertes der spez. Wärme c und des Feuchtigkeitsgrades φ % bestimmt. [Im Folgenden wird konsequent die innere Wärmeleitungsfähigheit k in $\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}}$ und der Feuchtigkeitsgrad φ in % von $\frac{\text{Wasser}}{\text{trock. Subst.}}$ (Gewichtsverhältnis) gerechnet].

Die Bodenarten waren Sandheide und Moorwiese, die folgendermassen definiert werden:

1 dm³ der Bodenerde enthält in g:

	Sand	Humus	Ton	Mineralische Bestandteile	Wasser	ϱ	$\varrho \cdot c$	φ %	$k \cdot 10^{-3}$
Sandheide	1490,7	18,5	30,80	—	230	1,770	0,537	14,9	282
Moorwiese	—	119,0	—	21,0	907	1,047	0,971	64,8	215

[1] Th. Homén, Der tägliche Wärmeumsatz im Boden und die Wärmestrahlung zwischen Himmel und Erde. Helsingfors 1897. 84.

Einige Jahre später diskutiert A. F. SUNDELL[1] in einem kleinen Aufsatz ausschliesslich theoretischer Art, wie Dampfbildung und Kondensation in feuchter Erde einwirken, besonders bei Temperaturablesung mittelst in die Erde in Schutzröhren oder direkt eingeführter Thermometer. Der Verfasser kommt zu dem Ergebnis, dass bei den von HOMÉN bei seinen obenerwähnten Untersuchungen getroffenen Anordnungen und Vorsichtsmassregeln Dampfbildung und Kondensation, praktisch genommen, keine Rolle spielen.

Ohne sich auf eigene Beobachtungen zu stützen, stellt MITSCHERLICH[2] in einer grösseren Arbeit eine Formel für die innere Wärmeleitungsfähigkeit von Sand bei verschiedenem Feuchtigkeitsgrad auf, welche Formel das Aussehen hat:

$$k = 0{,}000006\ X + 0{,}00151,$$

wo X den Feuchtigkeitsgehalt in Prozenten der Zwischenräume zwischen den Sandkörnern ausdrückt. k sollte also linear mit der Feuchtigkeit bei der gewählten Bezeichnung derselben steigen und zwischen den Grenzwerten 0,00151 und 0,00211 variieren. Von dieser Formel hat jedoch H. KARSTEN[3] in einer verdienstlichen Arbeit im Jahre 1910 nachgewiesen, dass sie jeder Giltigkeit ermangelt. Auf diese Arbeit KARSTEN's werde ich im Folgenden noch zurückkommen, da sie von allen Untersuchungen, die auf diesem Gebiete ausgeführt worden sind, mit meiner eigenen Untersuchung die meisten Berührungspunkte hat.

Bedeutend später (1909) erschien eine Abhandlung von dem Amerikaner HARRISON E. PATTEN[4] über die Wärmeleitungsfähigkeit von Bodenarten, bei welcher Untersuchung er dieselbe Methode wie HOMÉN angewandt hat. Von seinen Resultaten seien folgende über natürlichen feinen Quarzsand angeführt:

lufttrocken	$\varphi = 0$	$k = 0{,}0003$
feucht	11,1	0,0020
„	25	0,0035

---

[1] A. F. SUNDELL, Om värmeledning i fuktig jord. Finska Vet.-Soc. Öfversigt. Bd. XL. 1897—1898. 152.

[2] E. A. MITSCHERLICH, Bodenkunde für Land- und Forstwirte. Berlin 1905. 240.

[3] HUGO KARSTEN, Undersökningar af pulverformiga kroppars värmeledningsförmåga. Öfvers. af Finska Vet.-Soc. Förh. LIII A. N:o 17. 1910—1911.

[4] HARR. E. PATTEN, Heat transference in soils. U. S. Department of agriculture, Bureau of soils. Bulletin n:r 59. 1909.

Eine Untersuchung, die sich jedoch hauptsächlich auf trockene Bodenarten bezog, wurde 1911 von MELMER[1] veröffentlicht. Der Verfasser bediente sich einer ganz anderen Methode, als wie sie sowohl vor als nach ihm auf diesem Gebiete angewandt worden ist. Diese Methode stellte eine Modifikation dar von SCHLEIERMACHER's bekanntem Strahlungsversuch mit galvanischer Erhitzung von Platindrähten; der Platindraht war durch eine sehr dünne, ausgezogene Platinröhre ersetzt, in welche ein Quecksilberthermometer eingesetzt werden konnte. Diese Platinröhre, die einen (äusseren) Durchmesser von ca. 2,5 mm hatte, war koaxial von einer weiteren Röhre mit etwas über 2 cm (innerem) Durchmesser umgeben. Der Zwischenraum zwischen ihnen wurde mit dem zu untersuchenden Stoff ausgefüllt. Durch die Platinröhre wurde der zur Erwärmung dienende elektrische Strom geleitet. Der ganze Apparat befand sich in einem Bade von Paraffinöl.

Von den Resultaten, die sich u. a. auf einige Bodenarten aus der Umgebung Innsbrucks bezogen, seien folgende erwähnt.

Trockene Bodenarten.

1.	Roter Trientiner Marmorsand N:r 2. Mittelfeine Art 57 % Luftgehalt	$k = 0{,}0003596$
2.	*Sand* aus den glazialen Aufschüttungsterrassen an der Stephansbrücke bei I. ..... I.	0,0004525
3.	Sand aus den glazialen Aufschüttungsterrassen an der Stephansbrücke bei I. ..... II.	0,0004392
4.	Sand aus der liegenden Moräne ober der Weierburg bei I.	0,0002817
5.	*Lehm* aus der liegenden Moräne ober der Weierburg bei I.	0,0002998
6.	Lehm aus der geschlemmten Grundmoräne am "Ölberg" in Hötting bei I.	0,0001591
7.	Sand aus den glazialen Aufschüttungsterrassen des Inntales am Arzler Kalvarienberg bei I.	0,0003473
8.	Lehm aus den glazialen Aufschüttungsterrassen des Inntales am Arzler Kalvarienberg bei I.	0,0001827

[1] R. MELMER, Ber. Wien. Akad. d. Wiss. CXX II a. 269. 1911.

Feuchte Bodenarten.

Sand 1 der obigen Reihe	(ung. 2 %	Wasser)	k =	0,0005297
„ 1 „ „ „	(„ 26 %	„)		0,001148
„ 7 „ „ „	(„ 19 %	„)		0,001445

Der Verfasser giebt jedoch selbst zu, dass die Resultate bei angefeuchteten Sandarten sehr unsicher sind aus folgenden zwei Gründen: erstens verlangt die Methode es, dass die Stoffe nicht elektrisch leitend sind, was sie ja werden, wenn sie mit Wasser angefeuchtet werden; zweitens wird ein Teil der Wärme, die von der Platinröhre ausgeht, für die Verdunstung des Wassers verbraucht, so dass während des Fortganges des Versuches der Feuchtigkeitsgehalt variabel und inhomogen ist.

Aus den erhaltenen Werten geht auch deutlich die Unsicherheit der Methode hervor, da bei 26 % Wassergehalt das Verhältnis zwischen der Wärmeleitungsfähigkeit der feuchten Probe und derjenigen der trockenen nur etwa 3 : 1 ist, was, später erhaltenen Resultaten nach zu urteilen, allzu niedrig ist.

Es erübrigt nun noch, die obenerwähnte Arbeit von KARSTEN[1] ausführlicher zu referieren, die in physikalischer Hinsicht die genaueste und erschöpfendste sein dürfte, die bisher auf diesem Gebiete ausgeführt worden ist. KARSTEN geht von einer theoretischen Untersuchung der Wärmeleitungsfähigkeit kleiner Kugeln mit Luft und Wasser in den Zwischenräumen aus und deduziert einige recht komplizierte Formeln hierfür. Dann wird über einige Versuche mit verschieden grossen Schrotkugeln, Glaskugeln usw. berichtet, die zur Verifizierung der Formeln dienen sollten. Die Übereinstimmung erweist sich dabei als gut, und der von der Theorie geforderte Satz, dass die Wärmeleitungsfähigkeit von dem Durchmesser der Kugeln unabhängig ist, erhält seine Bestätigung. Der Durchmesser variierte bei diesen Versuchen zwischen 0,65 und 1,8 mm.

Die Wärmeleitungsmethode, die K. bei allen seinen Versuchen anwendet, ist die CHRISTIANSEN'sche Lamellenmethode bei stationärem Zustand. Er klagt jedoch über Fehler, die dieser Methode, wie sie bisher angewandt worden, anhaften und glaubt denselben dadurch abgeholfen zu haben, dass er in jeder der Temperaturkammern rotierende Propeller oder sog. Mischer anbringt, die die eine Seiten-

[1] H. KARSTEN, a. a. O., S. 3. Auch veröffentlicht in Int. Mitteil. f. Bodenkunde **1**. S. 524. 1911/1912.

fläche der Lamellen bei konstanter Temperatur erhalten sollen. Es unterliegt keinem Zweifel, dass diese Änderung *eine* wichtige Verbesserung des Apparats oder der Methode bedeutet, man dürfte aber zu weit gehn, wollte man behaupten, dass damit *alle* Fehler derselben beseitigt wären.

Mit dem so verbesserten Apparat setzt der Verfasser seine Untersuchungen fort und geht zu reinen, d. h. von Schlamm und Ton befreiten Sandarten in trockenem Zustand über, wobei er zuerst die Abhängigkeit der Wärmeleitung von der Korngrösse untersucht. Das Material war reiner Quarzsand, der Feldspat enthielt. Das Resultat ergab auch hier eine sehr gute Bestätigung des obenerwähnten Satzes von der Unabhängigkeit der Wärmeleitung von der Korngrösse.

Die wichtige Frage erhebt sich hiernach, ob das Resultat der Theorie sich auf solche pulverförmige Körper wie verschiedene Bodenarten in der Natur und bei ihrem verschiedenen Feuchtigkeitsgehalt anwenden lässt. Hiermit stehe ich bei der dritten und letzten Abteilung der Arbeit KARSTEN's, deren Inhalt hier eingehender besprochen werden soll.

KARSTEN arbeitete mit fünf verschiedenen Bodenarten, die von der agrikulturökonomischen Versuchsanstalt zu Ånäs zur Verfügung gestellt worden waren. Was die Methode betrifft, so verdient hier erwähnt zu werden, dass als Vergleichsschicht von dem Verfasser eine plane Glasplatte von 2,5 mm Dicke verwendet wurde. Ihre Wärmeleitungsfähigkeit wurde durch Vergleich mit einer Wasserschicht von 4 mm Dicke absolut bestimmt. Als Ausgangswert für die Wärmeleitungsfähigkeit von Wasser benutzt K. einen von MILNER und CHATTOCK[1] bestimmten Wert: $k = 0{,}00143 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}}$. Der Verfasser giebt nicht an, welche Mitteltemperatur er bei dieser absoluten Bestimmung angewandt hat; doch kann aus den Temperaturen der darauffolgenden Reihen geschlossen werden, dass diese Mitteltemperatur bei ung. + 6° C. liegen dürfte.

Folgende Resultate — ich habe mir erlaubt, sie nach steigendem Wassergehalt zu ordnen und in der vierten Spalte den Feuchtigkeitsgrad in % von $\frac{\text{Gewicht Wasser}}{\text{Gewicht trock. Subst.}} = \varphi$ zu berechnen — wurden für die untersuchten Bodenarten erhalten:

---

[1] MILNER und CHATTOCK: Phil. Mag. **46**. 48. 1899.

Tab. 1.

Material	Bemerkungen	trocken Gew. $\frac{g}{cm^3}$	nass Gew. $\frac{g}{cm^3}$	φ %	k $\frac{cal}{cm \cdot sec \cdot grad}$	Mittl. Temp.
1. *Feiner, rötlicher Sand.*	trocken	1,592	0,000	0,00	0,00046	4,5
		1,412	0,080	5,67	0,00170	8,0
Korngrösse:		1,181	0,087	7,37	0,00165	7,0
0,0—0,1 mm.		1,374	0,174	12,66	0,00231	8,4
		1,488	0,248	16,67	0,00194	9,5
		1,681	0,293	17,43	0,00267	6,3
		1,600	0,362	22,60	0,00338	10,9
	mit Feuchtigkeit gesättigt	1,427	0,444	31,10	0,00389	9,9
2. *Grober Sand.*	trocken	1,572	0,000	0,00	0,00047	5,2
Korngrösse:		1,366	0,084	6,15	0,00162	5,0
0,25—0,5 mm.		1,492	0,100	6,69	0,00200	6,3
		1,346	0,159	11,80	0,00153	8,6
		1,471	0,204	13,86	0,00177	6,5
		1,461	0,227	15,54	0,00233	6,0
	mit Feuchtigkeit gesättigt	1,438	0,396	27,50	0,00412	6,5
3. *Lehm.*	trocken	0,884	0,000	0,00	0,00033	4,1
		0,948	0,224	23,60	0,00089	6,0
	fast gesättigt	1,050	0,545	51,90	0,00202	6,1
	mit Wasser gesättigt	0,960	0,500	52,10	0,00207	8,1
4. *Sandhaltiger Lehmboden.*	trocken	1,271	0,000	0,00	0,00045	4,1
		1,135	0,137	12,07	0,00076	5,4
	fast breiartig	0,972	0,238	24,50	0,00134	5,0
	mit Wasser gesättigt	1,095	0,506	46,20	0,00315	6,5
5. *Moorboden.*	trocken	0,568	0,000	0,00	0,00027	3,8
		0,568	0,127	22,35	0,00066	4,6
	mit Wasser gesättigt	0,487	0,587	120,50	0,00108	5,0

Die Resultate werden näher durch Kurven im System $\left| \frac{k}{g \frac{Wasser}{cm^3}} \right|$ erläutert. Bei einem Überblick über die Resultate bemerkt der Verfasser:

"In Bezug auf das Wärmeleitungsvermögen von Bodenarten, die ein Gemisch mehrerer pulverförmiger Stoffe darstellen, wollen wir, ohne uns hier auf eine Besprechung der Verhältnisse einzulassen (die Frage kann nur durch eine eingehende Untersuchung gelöst werden), bloss auf einige Momente hinweisen. Es ist einleuchtend, dass die Feuchtigkeit auch hier eine wichtige Rolle spielt. Für die verschiedenen Erdschichten bekommen wir bezüglich des Verhältnisses zwischen der Wärmeleitungsfähigkeit der gesättigten und der der trockenen Erdschicht die Zahlen:"

	k_{w_∞} / k_{w_0}
feiner Sand	8,5
sandhaltiger Lehm	7,0
Lehm	6,3
Moorboden	4,0.

Der Verfasser erwähnt nichts darüber, wie die oben gefundenen Resultate mit seinen theoretisch gefundenen Formeln übereinstimmen, sondern geht schliesslich dazu über, einen mathematischen Ausdruck für die Abhängigkeit der Wärmeleitungsfähigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalt $\left(\frac{\text{g Wasser}}{\text{cm}^3}\right)$ aufzustellen von der Form:

$$k = k_0 + Ax + Bx^2 + Cx^3,$$

wo A, B und C Konstanten, x der Feuchtigkeitsgehalt und k_0 die Wärmeleitungsfähigkeit der Schicht in trockenem Zustande sind. Für feinen Sand z. B. wurden die Konstanten zu bzw. $+ 0{,}0173$, $- 0{,}052$ und $+ 0{,}07$ berechnet.

* * *

Betrachtet man die oben angeführten, von KARSTEN gefundenen Werte für die Wärmeleitungsfähigkeit von Bodenarten bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt, so muss es ja sehr eigentümlich erscheinen, dass sie so bedeutend bei zunehmendem Wassergehalt anwachsen, wie z. B. bei Sand, wo die beiden Komponenten, trockener Sand und Wasser, die Wärmeleitungsfähigkeit 5 bzw. 12 haben

und das Gemisch derselben den Wert 40 aufweist, sowie ferner, dass die Wärmeleitungsfähigkeit *kontinuierlich* mit dem Feuchtigkeitsgrade zunimmt.

Diese Verhältnisse mittelst einer anderen, bedeutend genaueren und sichreren physikalischen Methode zu untersuchen, ist der Zweck der vorliegenden Arbeit gewesen. Ich gehe nunmehr also zur Beschreibung meiner eigenen Untersuchung auf diesem Gebiet über.

KAP. I.

Über die Theorie der Methode.

Die Methode, die hier durchgehends zur Anwendung gekommen, ist H. F. WEBER'S[1] Lamellenmethode, eine absolute Methode mit variablem Temperaturverlauf, die sehr erfolgreich bei Flüssigkeiten angewandt worden ist, aber auch mit Vorteil sowohl bei festen Körpern (auch pulverförmigen) wie bei plastischen und teigförmigen (feuchten Bodenarten) zur Verwendung kommen kann. Die Methode ist kurz die folgende:

Zwei kreisrunde, planparallele Kupferplatten von ca. 15 cm Durchmesser schliessen zwischen sich eine horizontale Schicht von dem Stoffe, den man untersuchen will, die Lamelle, ein. Die Platten werden durch drei kleine vertikale Glaszylinder von ca. 3 mm Höhe in bestimmter Entfernung von einander gehalten. Die obere Platte muss etwas dicker als die untere (10 bzw. 6 mm) sein; die Temperatur der ersteren muss mittelst Thermoelement und Galvanometer während einer Temperaturvariation (Abkühlung) abgelesen werden können. In einem bestimmten Augenblick wird die ganze Plattenkombination auf eine horizontale, plane Eisplatte gestellt und das Ganze mit einer 0-gradigen Hülle von allen Seiten umgeben. Die Galvanometerausschläge zeigen dann die sukzessive Temperaturabnahme der oberen Platte an, Ablesungen werden nach einander in bestimmten Zeitzwischenräumen vorgenommen, welche Ablesungen nebst einigen Konstanten des Apparats, seinen Dimensionen, der Dicke der Lamelle usw. sowie dem spezifischen Gewicht und der spezifischen Wärme des Versuchsmaterials durch Berechnungen nach einer gleichfalls von WEBER gegebenen Theorie den gesuchten absoluten Wert der Wärmeleitungsfähigkeit k ergeben.

---

[1] H. F. WEBER. Wied. Ann. **10**. 103. 1880; Wied. Ann. **10**. 304. 1880; Wied. Ann. **10**. 472. 1880.

Man muss also zuvor das spezifische Gewicht und die spezifische Wärme des Versuchsmaterials kennen; diese letztere Forderung macht die Methode natürlich sehr mühevoll und zeitraubend, liefert aber auch im vorliegenden Falle ein wertvolles Nebenresultat: die spezifische Wärme von Bodenarten bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt.

Die Theorie sei nachstehend in gedrängter Form dargelegt.

H. F. Weber geht von der allgemeinen Differentialgleichung für Wärmeleitung in einem Stoff in drei Dimensionen x, y und z aus:

$$k\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right)=\varrho c\frac{\partial t}{\partial \tau} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Die hier gleichwie im Folgenden konsequent angewandten Bezeichnungen finden sich am Ende der Abhandlung besonders zusammengestellt.

t = Temperatur in Graden C.

τ = Zeit in Sek.

ϱ = spezifisches Gewicht $\left(\frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}\right)$.

c = spezifische Wärme.

Hierbei macht W. die Grundannahme, dass k, ϱ und c nicht Funktionen von t sind.

In einem zylindrischen Koordinatensystem (x, r und v) geht diese Gleichung (1) über in:

$$k\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}\right)=\varrho\cdot c\frac{\partial t}{\partial \tau} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

wo die x-Achse in der Achse des Zylinders, vertikal aufwärtsgerichtet, liegt, und r und v polare Koordinaten in der Horizontalebene sind. $x = 0$ ist also die untere Basisfläche der Lamelle.

Ferner macht er die Grundannahme, dass die untere Kupferplatte in dem System, die auf die Eisplatte gestellt wird, nach einer sehr kurzen Zeit 0°-Temperatur annimmt und diese Temperatur durchweg während des Versuches beibehält — also eine 0°-isothermische "Fläche" ist. Hiernach führt W. mit Hilfe einiger Grenzgleichungen sowie Besselscher Funktionen (nach Hansen's Tabellen) eine lange Rechnung durch, die zu der Schlussfolgerung

führt, dass während des Versuches auch die obere Kupferplatte, praktisch genommen, als eine isothermische "Fläche" angesehen werden kann. Ihre Temperatur wird als gleich der der oberen Fläche der Lamelle angenommen.

Die Lösung der partiellen Differentialgleichung (2) soll fünf folgenden Grenzgleichungen genügen:

für $x = 0$ ist $t = 0$ für alle τ . . . . . (3)

für $x = l$ ist t unabhängig von r für alle τ . . . . . (4)

für $x = \Delta$ ist:

$$- M_1 c_1 \left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)_{x=l} = k \cdot F \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=l} + h_1 F_1 t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

(Verlauf an der oberen Fläche der Lamelle).

Für $r = R$ ist:

$$k \left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=R} + h t_{r=R} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

(Verlauf an der Mantelfläche der Lamelle).

Schliesslich für $\tau = 0$ $t = T$, unabhängig von x und r. . . . (7)

Bezeichnungen:

M_1 = Masse der oberen Kupferplatte,

c_1 ϱ_1 = spez. Wärme und spez. Gewicht derselben,

Δ = Dicke der Lamelle,

Δ_1 = Dicke der oberen Kupferplatte,

h = äussere Wärmeleitungsfähigkeit der Lamelle (Newtons Konstante),

h_1 = äussere Wärmeleitungsfähigkeit der oberen Kupferplatte (Newtons Konstante),

F = Basisfläche der Kupferplatte,

F_1 = „ „ der oberen Kupferplatte + Mantelfläche,

T = Anfangstemperatur der Kupferplatte (bei $\tau = 0$),

R = Radius der Kupferplatte.

Eine einfache Lösung der Gl. (2) ist folgende:

$$t = Ae^{-\frac{k}{\varrho \cdot c} q^2 \tau} \sin qx + Be^{-\frac{k}{\varrho \cdot c}(p^2 + m^2)\tau} \sin px \, I^{\circ}_{mr} \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

wo I°_{mr} die Besselsche Funktion erster Gattung mit dem Index 0 und dem Argument mr, und wo die A, B, q und m 4 Konstanten

bedeuten, deren Werte aus den obigen vier Grenzgleichungen heraus zu bestimmen sind.

Die Konstante p ist die Wurzel der Gleichung $\sin(p\Delta) = 0$; also $p = \frac{n \cdot \pi}{\Delta}$, wo $n = 1, 2, 3$ usw. m ist eine analoge Wurzel der transszendenten Gleichung:

$$mR = \frac{I^1_{mR}}{I^\circ_{mR}} = \frac{h}{k} R.$$

Durch Berechnung dieser Wurzeln und Entwicklung (8) erhält man einen längeren Ausdruck, der jedoch unter der Annahme, dass τ einen Wert von einigen Sekunden erreicht hat und Δ einigermassen klein ist, auf sein erstes Glied:

$$t = Ae^{-\frac{k}{\varrho \cdot c} q^2 \tau} \sin(qx) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

reduziert werden kann.

Es ist beachtenswert, dass hier h verschwunden ist, und dass also bei WEBER's Herleitung diese Grösse nicht experimentell bestimmt zu werden braucht.

Um die Konstante q zu bestimmen, wird (9) mit der Grenzgleichung (5) für $x = \Delta$ kombiniert, woraus man erhält:

$$q\Delta \cdot \operatorname{tg}(q\Delta) = \frac{F \cdot \Delta \cdot \varrho \cdot c}{M_1 c_1 \left[1 - \frac{h_1 F_1 \varrho c \cdot \Delta^2}{k M_1 c_1} \cdot \frac{1}{(q\Delta)^2}\right]} \quad \ldots\ldots \quad (10)$$

Diese transszendente Gleichung hat unendlich viele Wurzeln $q_1\ q_2\ q_3$ — — — — usw. Die allgemeine Gleichung erhält also das Aussehen:

$$t = A_1 \cdot \sin(q_1 x)\ e^{-\frac{k}{\varrho c} q_1^2 \tau} + A_2 \sin(q_2 x)\, e^{-\frac{k}{\varrho c} q_2^2 \tau} +$$

$$+ A_3 \sin(q_3 x)\, e^{-\frac{k}{\varrho \cdot c} q_3^2 \tau} + \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

Da $q_2^2\ q_3^2$ — — — sehr rasch wachsen, dürfte man nach einiger Zeit Z die Glieder mit $A_2\ A_3$ — — — gänzlich vernachlässigen können. Es bleibt also nur das erste Glied übrig:

$$t = A_1 \sin(q_1 x)\, e^{-\frac{k}{\varrho c} q_1^2 \tau} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

Lässt man nun die Zeit Z (> 60 Sek.) verfliessen, bevor man die Beobachtungsreihe mit der Temperatur der oberen Platte ($x = \Delta$) beginnt, so erhält man:

$$t_{x=\Delta} = A_1 \sin(q_1\Delta)\, e^{-\frac{k}{\varrho c} q_1^2 (\tau + Z)} = U_1 \sin(q_1\Delta)\, e^{-\frac{k}{\varrho c} q_1^2 \tau}.$$

In bestimmten Zeitzwischenräumen (= τ_0) werden also $t_1\ t_2\ t_3 \ldots\ldots$ abgelesen, welche beziehungsweise sind:

$$U_1 \sin(q_1\Delta)\, e^{-\frac{k}{\varrho c} q_1^2 \tau},\quad U_2 \sin(q_1\Delta)\, e^{-\frac{k}{\varrho c} q_1^2 (\tau + \tau_0)},$$

$$U_3 \sin(q_1\Delta)\, e^{-\frac{k}{\varrho c} q_1^2 (\tau + 2\tau_0)} \ldots$$

Durch Dividieren und Logarithmieren erhält man:

$$k = \frac{1}{n\tau_0} \cdot \frac{1}{q_1^2} \cdot \varrho \cdot c \log \text{nat} \frac{t_i}{t_{i+n}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (13)$$

Index 1 bei q_1 von hier an vernachlässigt.

n = Anzahl Ablesungen während 1 Minute. In einem folgenden Kapitel beweist Weber, dass die Temperaturen t innerhalb relativ kleiner Temperaturgebiete proportional den Galvanometerausschlägen a sind, wenn diese nicht allzu gross sind; also $t = \text{Konst.}\ a$, weshalb (13) geschrieben werden kann:

$$k = \frac{\varrho c}{q^2} \cdot \frac{\lg \frac{a_i}{a_{i+n}}}{n\tau_0 \cdot \mathbf{M}} = \frac{\varrho c}{q^2} \cdot \mu \cdot p \quad \ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

wo $\mu = \lg \frac{a_i}{a_{i+n}}$, $\mathbf{M}$ = Modul der Briggschen Logarithmen = 0,43429,

$p = \frac{1}{n\tau_0 \cdot \mathbf{M}}$.

Gleichung (10) kann, wenn $(q\Delta)$ mit η bezeichnet wird, zu folgender vereinfacht werden:

$$\eta \cdot \operatorname{tg} \eta = \frac{\Delta \cdot \varrho \cdot c}{\Delta_1 \cdot \varrho_1 \cdot c_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{h_1 F_1}{F \Delta_1 \varrho_1 c_1} \cdot \frac{\varrho c}{k q^2}} \quad \ldots\ldots \quad (15)$$

Aus (14) und (15) kann k schliesslich berechnet werden. Siehe das durchgerechnete Beispiel auf S. 29 u. f.!

Bei der Bestimmung der erforderlichen Werte der spezifischen Wärme c habe ich mich der Abkühlungsmethode bedient. Die Theorie dieser Methode ist sehr einfach.

Wenn man einen Körper, der als eine isothermische "Fläche" bildend angenommen wird, sich abkühlen lässt und seine Temperatur z. B. mittelst Thermoelements und Galvanometerausschlägen in bestimmten Zeitzwischenräumen τ_0 abliest, so gilt die Differentialgleichung:

$$-c\,m\,dt = h_c\,O \cdot t\,d\tau + o \cdot t \cdot d\tau \quad \ldots\ldots\ldots \quad (16)$$

m = ganze Masse des Körpers (Kalorimeters).
O = Oberfläche des Körpers (Kalorimeters).
o = Wärmeleitungsfähigkeit × Berührungsfläche für die Stütze.
h_c = äussere Wärmeleitungsfähigkeit.
h_c und c werden als konstant angenommen.

Wird diese Gleichung aufgelöst und setzt man die Konstanten ein, so erhält man:

$$l\frac{t_i}{t_{i+n}} = \frac{h_c O + o}{mc} \cdot n\tau_0 \quad \text{oder} \quad l\frac{a_i}{a_{i+n}} = \frac{h_c O + o}{mc}\, n\tau_0 \ldots\ldots \quad (17)$$

Wird $\lg\frac{a_i}{a_{i+n}}$ mit μ_c bezeichnet, so erhält man:

$$h_c O + o = p\,\mu_c \cdot mc \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (18)$$

Nun werden nach einander drei Versuche, von denen die zwei ersten nicht wiederholt zu werden brauchen, gemacht, um c bei einer Bodenprobe zu bestimmen:

1) $$h_c O + o = p\,\mu_0(m'c' + \varepsilon) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (19\,a)$$

m' = Gewicht des Kalorimetergefässes.
c' = spez. Wärme des „
ε = Wasserwert der eingeschlossenen Luft.

2) $$h_c O + o = p\ \mu_w (m'c' + m_w) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (19\ b)$$

Kalorimeter gefüllt mit m_w g Wasser.

3) $$h_c O + o = p\ \mu_c (m'c' + mc) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (19\ c)$$

Kalorimeter gefüllt mit der Bodenprobe.

Aus diesem Gleichungssystem erhält man durch Substituierung und Vereinfachung:

$$c' = \frac{m_w \mu_w - \varepsilon \mu_0}{m' (\mu_0 - \mu_w)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (20)$$

und

$$c = \frac{\mu_0}{\mu_c} \frac{m'c' + \varepsilon}{m} - \frac{m'}{m} \cdot c' \quad \ldots\ldots\ldots \quad (21)$$

Man bestimmt also c' ein für allemal aus (20) und berechnet c aus (21), nachdem m durch Wägung erhalten und μ_c aus der Beobachtungsreihe berechnet worden.

KAP. II.

Versuchsanordnungen.

A. Wärmeleitungsversuch.

Zu Beginn des vorigen Kapitels ist bereits erwähnt worden, welche Dimensionen im allgemeinen zweckmässigerweise dem Weberschen Apparat zu geben sind. Der Apparat, mit dem ich arbeitete, war besonders gross zur Anwendung für Bodenarten konstruiert worden, so dass eine einigermassen grosse Menge untersucht werden konnte, ohne dass die Dicke der Lamelle beträchtlich vermehrt zu werden brauchte. Damit nicht der Apparat in seiner Gesamtheit allzu schwer werden sollte, wurden die Platten (nahezu) gleich dick und relativ dünn gemacht. Sie waren beide stark vergoldet (ungefähr 4 g Gold auf eine Gesamtfläche von nahezu 13,5 dm^2). Die Dimensionen waren:

Obere Platte: Durchmesser $2R$: 20,05 cm
Dicke Δ_1 : 0,6672 . . . 0,6667 cm (infolge Abnutzung)
Gewicht M_1 : 1869,84—1868,81 g „ „
spez. Gewicht ϱ_1 : 8,871 . . . 8,8828
Basisfläche F : 315,73 cm^2
Basisfläche + Mantelfläche F_1 : 357,76 cm^2.

Untere Platte: Durchmesser $2R$: 20,05 cm
Dicke Δ_2 : 0,6703 . . . 0,6700 (infolge Abnutzung)
Gewicht M_2 : 1881,1 g
spez. Gewicht ϱ_2 : 8,889.

Die Platten waren von Instrumentenmacher G. Rose, Upsala, angefertigt worden.

Die obere Platte war im Zentrum mit einem ca. 1 mm grossen Loch zum Eingiessen von Wasser oder Flüssigkeiten bei Versuchen mit solchen versehen. 2—3 cm von diesem Loch entfernt war ein feineres Loch gebohrt, ca. 3 mm tief und nach unten zu auf 0,5 mm

Durchmesser verengt, zum Einsetzen des Thermoelements auf der oberen Fläche. Am Rande der unteren Platte war ein ähnliches Loch nach dem Zentrum hin gebohrt worden, um untersuchen zu können, wie schnell diese Platte die Temperatur 0° nach dem Niedersetzen auf die Eisplatte annahm.

Die drei kleinen Glasprismen, die bei den Erduntersuchungen angewandt wurden, waren zylindrisch und hatten folgende Dimensionen: Höhe: 0,4776, 0,4778, 0,4780 cm; Durchmesser: 0,65 cm; das Gesamtgewicht betrug 1,51 g, das Gesamtvolumen 0,61 cm^3.

Die Apparatanordnung ist aus nachstehender schematischer Figur ersichtlich:

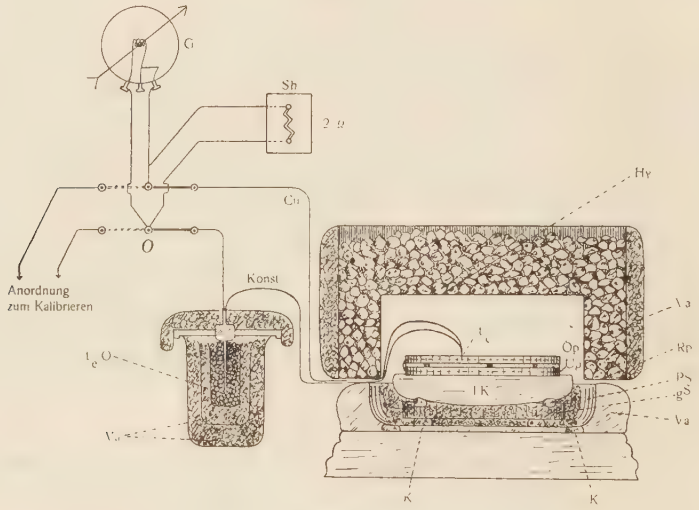


Fig. 1.

O ist ein gewöhnlicher Stromwender, frei von Thermoeffekt; mittelst desselben kann der Galvanometer *G* in Verbindung gesetzt werden mit dem Thermoelement t_e (ausgezogene Linie) oder mit der Apparatur zur Kalibrierung und Bestimmung der Empfindlichkeit (gestrichelte Linie), oder auch der Galvanometer ausgeschaltet werden.

Dem Thermoelement t_e war grosse Sorgfalt zugewandt worden, da die Genauigkeit der Resultate in hohem Grade von seiner Funktion abhing. Es bestand aus Kupfer und Konstantan, das innerhalb relativ kleiner (Temperatur-)Intervalle den Temperaturverlauf vollkommen proportional wiedergiebt. Beide Arten von Drähten

hatten einen Durchmesser von ca. 0,3 mm, waren mittelst Seide isoliert und mit Schellacklösung gefirnisst. Die Lötstellen selbst waren durch Aushämmern etwas abgeplattet und zugespitzt und mit Asphaltlack in mehreren Schichten überzogen. Die 0-Punktlötstelle $t_e 0$ war in eine schmale, in eine Spitze ausgezogene Glasröhre eingesetzt, die in ein mit feinzerstücktem Eis oder Schnee gefülltes Becherglas hineingesteckt gehalten wurde. Dieses Glas war in ein grösseres Becherglas hineingestellt; der Zwischenraum war mit Watte ausgefüllt, und auch nach oben war die Becherglasanordnung gut wärmeisoliert. Teils dank der guten Wärmeisolierung auf allen Seiten und teils dank dem Umstande, dass das Becherglas eine recht beträchtliche Menge Eis fasste, konnte diese 0°-Lötstelle sich einen ganzen Tag und länger auf 0° halten.

Die Grösse des Apparats[1] machte recht beträchtliche Dimensionen der Hülle erforderlich. Die Hülle (*Hy*), aus starkem Zinkblech, war in der Weise konstruiert, dass zwei verschieden grosse Zylinder, der kleinere, mit dem Boden nach oben gewandt, in dem grösseren steckend, mittelst eines ringförmigen Blechstreifens, *Rp*, zusammengelötet wurden. Der Raum zwischen ihnen fasste über 15 kg Eis. Auf der Aussenseite war die Hülle mit Watte, *Va*, bekleidet. Sie ruhte während der Versuchsserie selbst auf dem oberen Rande einer grossen, niedrigen Porzellanschale, *PS*, die auf der Aussen- und Unterseite mittelst Watte gut wärmeisoliert war. In dieser Porzellanschale befand sich eine kleinere, niedrige Glasschale, *gs*, angefüllt mit Eis; auf dieser Schale, die auf drei Korkstücken ruhte, befand sich das bereits erwähnte Eisstück *IK*, oben plan, rund und auf der Unterseite linsenförmig gestaltet, auf welches Eisstück der Apparat (*ÖP* und *UP*) zu Beginn des Versuches gestellt wurde. Sowohl *PS* als auch *gS* ruhten je auf drei Korkstücken. Im übrigen war *PS* mit fein zerkleinertem Eis angefüllt.

Die Zeitbestimmungen geschahen mit Hilfe einer elektrischen Sekundäruhr, die an die Präzisionsuhr des Instituts angeschlossen war. Ausschläge und Temperaturen wurden meistens alle 15 Sekunden ($\tau_o = 15$) während der Wärmeleitungsserien bestimmt, bei einigen der schnellst verlaufenden alle 10 Sekunden; doch kamen auch τ_o mit den Werten 20, 30 und 60 Sek. vor.

Bei den Kalorimeterserien wurden die Ablesungen in der Regel

[1] Die grössten Dimensionen, die meines Wissens bei einem Weberschen Apparat zur Verwendung gekommen sind. Der von Weber selbst benutzte wies nur einen Durchmesser von 16 cm auf.

alle 5 Minuten vorgenommen, weshalb sie also bedeutend langsamer von statten gingen; doch kamen bei den trockenen Proben Zeitintervalle von 2 und 3 Minuten vor.

Der Galvanometer, *G*, war von D'Arsonval-Typ, von Siemens & Halske bezogen; seinem inneren Widerstande nach war er recht empfindlich. Er wurde fast aperiodisch dadurch gemacht, dass dem eigentlichen System von ca. 50 Ohm ein im Galvanometer befindlicher Widerstand von ca. 250 Ohm vorgeschaltet wurde. Um die Empfindlichkeit auf die geeignete zu vermindern, musste er ausserdem mit Nebenschluss versehen werden. Der Widerstand bei diesem Nebenschluss, *Sh*, belief sich nur auf 2 Ohm. Bei dem von mir benutzten Thermoelement, das einen Gesamtwiderstand von ca. 4,7 Ohm hatte, sowie bei 264 cm Skalenabstand, entsprach 1° Temperaturdifferenz zwischen den Lötstellen einem Galvanometerausschlag von 24 mm (0,1 mm konnte deutlich geschätzt werden). Wie aus der Figur ersichtlich, war *G* stets durch den Nebenschluss *Sh* geschlossen, so dass eventuelle Störungen durch fremde Thermokräfte ausgeschlossen waren.

Auf die Kalibrierung des Thermoelements, wurde viel Arbeit verwandt. Es ist bereits oben (S. 14) erwähnt worden, dass das Verhältnis zwischen Temperaturen t durch das Verhältnis zwischen den entsprechenden Galvanometerausschlägen α ersetzt werden kann. Hierzu ist indessen erforderlich, dass die letzteren den elektromotorischen Kräften (im Thermoelement), die sie bewirken, proportional sind. Eine Abweichung hiervon ist in einem gewissen geringen Grade bei allen Galvanometern vorhanden. Ferner hat man den Skalenfehler: man rechnet statt der Winkel selbst ihre Tangenten. Man erhält also beim Kalibrieren die Summationswirkung aller hier angedeuteten Fehler. Die Untersuchung geschah in zweifacher Weise; teils in Kombination mit einem Normalthermometer, graduiert in Zehntel Celsiusgrade, und teils mit Hilfe eines Normalmilliamperemeters Hartmann & Braunscher Fabrikation. Diese Untersuchungen, deren Verlauf und Resultate im einzelnen hier nicht wiedergegeben werden, ergaben, dass die Abweichungen, die in Wirklichkeit sich zeigten, nicht auf μ so einwirkten, dass eine Korrektion nötig gewesen wäre, sondern dass sie vollständig innerhalb der Fehlergrenzen sich bewegten. Doch war darauf zu achten, dass bei allen Galvanometerablesungen der Galvanometer und die Skala unverändert ihre Lage im Verhältnis zu einander, die sie während der Kalibrierungen innehatten, und auch, wenn möglich, dieselbe

Nullpunktslage beibehalten mussten. Der Nullpunktsskalenstrich war auch so nahe wie möglich 200 mm bei allen Serien. Die Ausschläge waren in der Regel nicht höher als von 400 mm an zu Beginn der Serie, ausnahmsweise niedriger, und die Serie wurde gewöhnlich abgebrochen, wenn die Ausschläge auf 230 mm gesunken waren.

Ein Wärmeleitungsversuch ging in der Regel folgendermassen vor sich. Nachdem der Apparat in der weiter unten zu beschreibenden Weise mit der fraglichen Bodenprobe gefüllt worden war, wurde derselbe auf einer Wage gewogen, die Wägung bis zu 10 kg mit einer Genauigkeit von mindestens 0,01 g erlaubte. Der Apparat mit Probe wog ca. 4 kg. War die Probe feucht, so wurde der Zeitpunkt der Wägung (zweite Wägung) notiert. Die erste Wägung wurde mit dem leeren Apparat, also vor dem Füllen, vorgenommen. Nach mindestens einer halben Stunde wurde er aufs neue gewogen (dritte Wägung), um die Verdunstung des Wassers bestimmen und so das genaue *Gewicht* desselben in der Mitte der Serie extrapolieren zu können. Unterdessen wurde der Nullpunkt des Galvanometers eingestellt und die verschiedenen Eisbehälter gefüllt, $t_e 0$ mit besonders feinzerstückeltem Eis. Das Eisstück, das vorher "skulptiert" worden war, wurde horizontal auf seiner Unterlage, *gS*, placiert und zum letztenmal mittelst einer dicken und planen Kupferplatte plan gemacht.

Die Dicke des Apparats wurde nun mittelst Mikrometerschrauben an 4 symmetrisch gelegenen Punkten gemessen, und da ich vorher die Gesamtdicke der beiden Platten an 4 gleichgelegenen Punkten gemessen hatte, so gab also die Differenz der Mittelwerte die Dicke, Δ, der Erdschicht an. Danach wurde der Apparat in einer besonders für den Zweck konstruierten Hebevorrichtung placiert, die Lötstelle t_e an ihren Platz eingesetzt und die Lage des Galvanometernullpunktes, nachdem die Sekundäruhr in Gang gesetzt worden, jede $^1/_2$ Minute während ca. 3 Minuten beobachtet. Sodann wurde der Apparat horizontal gehoben und auf das Eisstück niedergesetzt, die Zeit beobachtet und die grosse Eishülle vorsichtig aufgesetzt. Nun wurde der Nullpunkt noch einmal abgelesen, worauf *G* mittelst 0 in den Thermokreis eingeschaltet wurde. Nach etwa $1^1/_2$ Minuten begannen die Ablesungen, auf die oben beschriebene Weise, und nachdem *G* ausgeschaltet worden, wurde die Nullpunktablesung wie vor Beginn der Serie vorgenommen. Die Serie selbst nahm im allgemeinen bei den feuchten Proben 4—8 Min., bei den trockenen 15—30 Min. in Anspruch; bei diesen letzteren geschahen

die Ablesungen jedoch nur jede Minute, und der Nullpunkt wurde zwischen je zwei Ablesungen bestimmt.

War so die Serie abgeschlossen worden, so wurde der Apparat auseinandergenommen, das Präparat aufgesammelt, getrocknet, im Mörser pulverisiert und zum letzten Mal gewogen.

B. **Kalorimeterversuch.**

Bei der Wahl einer Methode zur Bestimmung der spezifischen Wärme der verschiedenen Bodenarten entschied ich mich für die Abkühlungsmethode. Diese Methode hat zwar ihre Mängel, für den hier fraglichen Zweck überwogen aber ihre Vorteile beträchtlich. Die Bestimmung der spezifischen Wärme geschieht ja bei dieser Methode unter ganz analogen Temperaturverhältnissen — beinahe dasselbe Temperaturgebiet und dieselbe logarithmisch sinkende Temperaturkurve — wie während des Wärmeleitungsversuches. Ferner konnte dieselbe Apparatur mit Ausnahme des Kalorimetergefässes selbst wie bei dem Hauptversuch angewandt werden. Schliesslich können gewisse Fehlerquellen durch konstruktive Vorsichtsmassregeln beträchtlich reduziert werden, und die übrigbleibenden haben geringere Bedeutung, da ihre Einwirkung auf den schliesslichen k-Wert eine wesentliche Verminderung erfährt, wie ich im Folgenden (Über die Fehlergrenzen, S. 54) zeigen werde.

Der Abkühlungskalorimeter war ein aus 0,6 mm dickem Kupferblech angefertigtes niedriges, zylindrisches Gefäss, von ca. 19 cm Durchmesser und 1 cm Höhe, das ca. 270 cm^3 Wasser bei 15° C fasste; es war mit einem abnehmbaren planen Deckel von derselben Art Blech versehen. Sowohl das Gefäss als der Deckel waren auf der Innen- und Aussenseite blank vernickelt. Der Deckel passte in einen Falz am oberen Rande des Gefässes, so dass er dort fest und dicht schloss. Im Zentrum des Deckels war ein ca. 3 mm weites Loch angebracht, durch das ein am Boden des Kalorimetergefässes festgelöteter, mit Falz versehener Kupferstift hindurchragte. Der über dem Falz befindliche Teil des Stiftes war mit einem Schraubengewinde versehen, das zu einer entsprechenden Mutter passte, welche also das Zentrum des Deckels in einem konstanten Abstande (= nahezu 1 cm) vom Boden des Gefässes festschrauben konnte.

In diesen Stift war von oben her ein oben $^3/_4$ mm, unten nur 0,5 mm weites und 7 mm tiefes Loch zur Aufnahme der Thermo-

spitze t_e gebohrt, die also mit Friktion mitten im Stift und zugleich im Zentrum des Kalorimeters befestigt wurde. Dadurch, dass der Kalorimeter eine runde Plattenform hatte, der kupferne Stift die beiden Basisflächen mit einander verband und mit dem Bodenpräparat in Berührung stand und t_e mitten in demselben placiert war, war also auf beste Weise dafür gesorgt, dass die angegebene Temperatur auch der Mitteltemperatur der Bodenart entsprach.

Während des Kalorimeterversuchs wurde der Kalorimeter auf einen dünnwandigen, ca. 8,5 cm hohen und 11,3 cm im Durchmesser haltenden Glasring (abgesprengte Becherglaswand) gestellt, der seinerseits auf drei Korkstücken ruhte, und Eis wurde bis zu 5—6 cm von der Unterseite des Gefässes hin eingefüllt. Es wurde genau darauf gesehen, dass das Eis gleichmässig und gleich hoch bei jeder Serie eingefüllt wurde. Vorher waren, nachdem der Kalorimeter mit dem bereitgestellten Präparat gefüllt worden war, Wägungen in derselben Weise, wie oben bei dem Wärmeleitungsversuch beschrieben, jedoch mit längeren Zeitintervallen zwischen den Wägungen, vorgenommen worden. Nachdem der Kalorimeter auf der ringförmigen Glasstütze placiert worden, wurde die Hülle aufgesetzt, und das Ganze wurde noch weiter oben und rings umher mittelst einer ca. 5 cm dicken Watteschicht wärmeisoliert. Durch diese gute Isolierung habe ich es dahin gebracht, dass der Kalorimeter sich bis auf $+0°{,}005$ C abkühlt, was beweist, dass praktisch genommen keine Wärme von aussen her in die Abkühlungskammer hineinkommen kann.

Der Nullpunkt wurde hier 30 Sek. vor und nach jeder Ausschlagablesung abgelesen, was leicht durchzuführen war, da diese nur alle 5 Minuten vor sich gingen. Die Temperaturgrenzen waren doppelt so gross wie bei den Wärmeleitungsserien, von ca. $+8°$ bis ca. $+1°{,}2$, also eine Mitteltemperatur von ungefähr $3°{,}2$. *Sämtliche von mir ausgeführten Bestimmungen der Wärmeleitungsfähigkeit und spez. Wärme trockener und feuchter Bodenarten beziehen sich also auf eine Mitteltemperatur von $1°{,}6$ bzw. $3°{,}2$ C.*

KAP. III.

Die allgemeine Behandlungsweise der Bodenarten.

Die folgenden sieben Bodenarten sind untersucht worden:

Nr. 107 *Sandbäck*, ein kaolinischer, sandiger Moränenton.

Nr. 235 *Sandbäcksmull*, ein humusreicher, magerer Sedimentboden.

Nr. 117 *Kosta*, ein Gärton.

Nr. 381 *Ekerum*, eine schwere Tonschwarzerde.

Nr. 123 *Svedala*, ein sehr schwerer Ton.

Torestorpsmossen, Waldtorf (Laubwaldtorf), humusreich.

Flahult, Moostorf, unvermodert.

Es ist bereits darauf hingewiesen worden, dass die Grösse der Apparate die Untersuchung recht grosser Quantitäten ermöglichte, was in gewissem Grade die Genauigkeit bei allen Bestimmungen erhöht hat. Bei den Wärmeleitungsversuchen hat das Gewicht der Proben zwischen 200 und 300 g, bei den spezifischen Wärmeversuchen zwischen 300 und 500 g variiert; die Torfböden waren jedoch bedeutend leichter.

Das Ausgangsmaterial wurde auf folgende Weise vorbehandelt. Grössere Klumpen wurden zerklopft und in warmer Luft getrocknet. Danach wurden ca. 1 ½ — 2 kg in Porzellanmörser pulverisiert. Das feinzerriebene Material liess ich dann durch ein Sieb von ca. 1,5 mm Maschenweite für die sandigeren Bodenarten, 0,5 mm Maschenweite für die feinkörnigeren (Tone) hindurchgehen, damit nicht grössere Steine oder Klumpen mitkommen sollten. Sodann wurde das Material aufs neue unter fleissigem Umrühren in einem Warmluftrockenschrank, der besonders für diesen Zweck konstruiert worden war, getrocknet, wobei die Temperatur der Bodenart niemals 40—50° C. überstieg, damit das hygroskopisch gebundene Wasser nicht

weggehen sollte. Nachdem das ganze Ausgangsmaterial auf diese Weise mindestens drei Tage lang durchtrocknet und gemengt worden war, wurde es auf die verschiedenen Untersuchungen, soweit es reichte, verteilt, weshalb dieselbe Probe der Regel nach die verschiedenen Feuchtigkeits-, Trocknungs- und Zerreibungsprozeduren nicht mehr als *ein* Mal durchzumachen brauchte.

Zum Anfeuchten der Proben wurde stets destilliertes Wasser benutzt. Als Geräte beim Mengen, Kneten, Umrühren usw. der feuchten Proben wurden Löffel und Messer aus Horn verwendet. Die Proben wurden gewöhnlich so angefeuchtet, dass der vorher abgewogenen Trockenprobe sukzessiv Wasser bis zu teigförmiger Konsistenz zugesetzt wurde; hiervon ausgehend wurden die wasserreicheren Feuchtigkeitsgrade durch langsame Verdünnung oder Einkneten von Wasser, die trockneren Feuchtigkeitsgrade durch langsames Trocknen und Kneten erhalten.

Der Feuchtigkeitsgehalt ist mittelst des Verhältnisses zwischen den Gewichten des Wassers und der getrockneten Probe definiert und in Prozenten, q, ausgedrückt worden, ausser bei der unerhört viel Wasser aufnehmenden Bodenart Flahult, wo der Feuchtigkeitsgrad direkt durch das ebenerwähnte Verhältnis ausgedrückt wird; die trockene Probe ist mit q_0 bezeichnet worden, die feuchteste, die im allgemeinen flüssig war, die Konsistenz einer "Schleimsuppe" hatte, mit q_∞, dazwischen liegen $q_1\ q_2\ q_3\ (q_4)$ mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt. In einigen Fällen, wo es angängig gewesen, ist der niedrigere Feuchtigkeitsgrad aus dem höheren durch Trocknen im Apparat selbst erhalten worden. Der so erhaltene Feuchtigkeitsgrad ist dann beispielsweise mit q_{21} bezeichnet worden, und es ist sogar vorgekommen, dass der Feuchtigkeitsgehalt einer Probe auf diese Weise um 2 φ-Grade erniedrigt worden ist, also φ_{210}.

Der Feuchtigkeitsgrad q ist durch Wägungen auf folgende Weise bestimmt worden. In einer vorher gewogenen Porzellanschale wird, wie oben angegeben, die Probe in die gewünschte Konsistenz gebracht, und durch Wägen von Probe und Schale wird der φ-Grad ungefähr bestimmt, wobei jedoch der Wassergehalt etwas höher genommen wird, als man ihn während des Versuches selbst wünscht. Die trockene Ausgangsprobe war im voraus gewogen. Hat nun die Probe den gewünschten und zum Einfüllen geeigneten q-Grad erhalten, so wird das Einfüllen in den Apparat vorgenommen. Dieses lässt sich verhältnismässig leicht im Kalorimeter tun, der einen abnehmbaren Deckel hat, bei dem Wärmeleitungsapparat dagegen stellt

sich die Sache recht beschwerlich. In der Regel ist diese Füllungsprozedur folgendermassen vor sich gegangen.

Der Apparat wird horizontal auf eine geeignete Unterlage, einen Holzklotz o. dgl., gestellt und der Rand ringsherum mit einem Gummiisolierband bekleidet, das so breit bemessen ist, dass es auf jede der beiden Kupferplatten ca. 3 mm übergreift. Nachdem das Gummiband hinreichend fest geworden ist, wird der Apparat vorsichtig aufgehoben und in vertikaler Stellung in einer Vorrichtung von Holz mit horizontalen Schraubzwingen placiert, in welcher die Platten fest gegen einander geschraubt werden können, nicht aber zu fest, da sonst die dazwischenliegenden Glasstützen zerbrochen werden können. Eine Öffnung wird darauf in dem Gummibande oben herausgeschnitten und durch diese das Präparat in kleinen Portionen so fest und so gleichmässig wie möglich hineingestopft — die flüssigen Proben werden hineingegossen. Nachdem das Einfüllen beendet worden, wird ein kleinerer Streifen Gummiband, der vorher gewogen worden, über die Öffnung geklebt, und der Apparat kann nun, aus dem "Schraubstock" herausgenommen, gewogen werden usw., wie oben beschrieben worden ist. Der Teil der Probe, der bei dem Füllen übrig geblieben ist, wird aufgesammelt, getrocknet und gewogen. Man erhält so eine Kontrolle für das Gewicht der trockenen Probe, denn der Unterschied zwischen der trockenen Ausgangsprobe und dem getrockneten Rest muss gleich der nach dem Versuch getrockneten, pulverisierten und gewogenen Versuchsprobe selbst sein. Das Gewicht der Versuchsprobe wird direkt erhalten als der Unterschied zwischen dem Gewicht des gefüllten Apparats, extrapoliert für die Mitte der Serie, und dem zuvor bestimmten Gewicht des leeren Apparats mit Zubehör.

Das spezifische Gewicht ϱ ist mittelst des Verhältnisses $\frac{\text{Gewicht}}{\text{Volumen}}$ der Bodenprobe selbst im Apparat bestimmt worden, da ja das Volumen leicht und genau, nachdem l gemessen worden, aus den Dimensionen desselben hat berechnet werden können. Gewöhnlich hat sich die Bodenprobe nicht streng im Niveau der Zylindermantelfläche der Platten gehalten, sondern eine Aus- oder Einbuchtung aufgewiesen; in diesen Fällen ist das Mehr oder Weniger des Volumens durch Abkratzen und Wägen oder durch Messung berechnet worden. Bei der Berechnung des spezifischen Gewichts ist keine Rücksicht auf die "eingemauerten" Glasstützen, wohl aber auf das umschliessende Gummiisolierband genommen worden.

Die Wägungen sind im allgemeinen mit einer Genauigkeit von 0,01 g ausgeführt worden. Bei dieser recht beträchtlichen prozentischen Genauigkeit hat eine Korrektion für die Ungleicharmigkeit der Wage vorgenommen werden müssen, welche Korrektion bei 1000 g gleicher Belastung ungefähr 0,01 g betrug. Ferner sind alle Wägungen von Bodenarten mit Rücksicht auf den Luftauftrieb korrigiert worden. Diese Korrektion hat sich bis auf 0,40 g belaufen.

Es liesse sich denken, dass die Bodenproben infolge der mehrfachen Behandlung, die sie sowohl vor als nach dem eigentlichen Versuche erfahren haben, in gewissem Grade ihre natürlichen Eigenschaften verändert oder, genauer gesagt, Eigenschaften angenommen haben könnten, die sie niemals in ihrem natürlichen Zustande gehabt haben. Beim Zerreiben im Porzellanmörser z. B. lässt es sich ja nicht vermeiden, dass Körner höherer Grössenklassen in niedrigere übergehen; beim Kneten und Umrühren hat es sich ferner als unvermeidlich erwiesen, dass Luft in feinverteiltem Zustande in die Mischung eingerührt wurde. Besonders wollen die Tone bei höherem Wassergehalt gern eine Konsistenz annehmen, die ich mit der von "zerrührter Butter" vergleichen möchte, welche Konsistenz sie ja draussen in der Natur nicht erhalten können. Es dürfte indessen kaum einen Weg geben, auf dem man ohne Anwendung von Kneten oder Umrühren binnen angemessener Zeit einen gewünschten Feuchtigkeitsgrad bei einer Bodenart erhielte, so dass dieselbe *homogen* wird. Was das Zerreiben betrifft, so ist dasselbe mit Vorsicht geschehen, und die Prozedur ist abgeschlossen worden, sobald der pulverförmige Zustand erreicht war und grössere Klumpen sich nicht mehr im Mörser zeigten. Ausserdem haben die Proben, wie bereits erwähnt, im allgemeinen eine Feuchtigkeitsbehandlung nicht mehr als einmal durchgemacht.

KAP. IV.

Die experimentellen Ergebnisse.

1. Vorbereitende Versuche.

Bevor mit dem oben beschriebenen Weberschen Apparat Versuche mit den Bodenarten angestellt wurden, fanden einige Vorversuche mit Wasser statt, um festzustellen, wie die für den Zweck angefertigten Apparate funktionierten, und um die Genauigkeit des erhaltenen Resultats zu prüfen. Das Ergebnis eines der Versuche sei hier in Kürze mitgeteilt.

Vorversuch: Wasser:

$\Delta = 0{,}3205$	$\lg \xi' = 0{,}76956 - 1$
$\mu = 0{,}16455$	$\lg \eta' = 0{,}84468 - 1$
$\varrho = 1$	$k' = 0{,}001326$
$c = 1$	$\varkappa = 0{,}01911$
$c_1 = 0{,}092$	$\lg \xi = 0{,}77794 - 1$
Mittl. Temp. 1°,6	$\lg \eta = 0{,}84814 - 1$
$k = 0{,}001305$	

Korr. für den Rand + 0,000005 (0,5 %) $\therefore k = \mathbf{0{,}00131.}$

Zum Vergleich seien einige der sichersten bisher bekannten Resultate angeführt:

Tab. 2.

Autor und Litteratur	Mittl. Temp.	Jahr	k cal / cm·sec·grad	k umgerechnet auf 1°,6 C.
1. H. F. Weber (a. a. O., S. 10)	4°,1	1880	0,00124	0,001216
2. » Berl. Ber. *1885.* 809.	9—15°	1885	0,00136	0,001266
» dasselbe wie 1., umgerechnet von Lorberg, W. A. *14.* 308. 1881	4°,1	1881	0,001386	
Grætz, W. A. *18.* 79. 1883.....	30°	1883	0,00158	0,001295
Wachsmuth, W. A. *48.* 158. 1893	4°,1	1893	0,001294	0,00127
Milner u. Chattock, Phil. mag. (5) *48.* 46. 1899	20°	1899	0,001433	0,001253

Beim Umrechnen ist der Temperaturkoeffizient der Wärmeleitungsfähigkeit nach H. F. Weber zu + 0,00786 angenommen worden.

Nach den Bodenartuntersuchungen wurden zwei genaue Versuche mit Wasser angestellt. Siehe Kap. V, S. 52.

2. Rechenbeispiel.

Rücksichten auf den Raum verbieten es, sämtliche Beobachtungen für alle Bodenarten und Feuchtigkeitsgrade in Tabellen wiederzugeben. Stattdessen gebe ich hier *ein Beispiel* mit möglichst vollständigem Beobachtungsmaterial und durchgeführten Berechnungen. Es dürfte auf diese Weise leicht sein, das Prinzip der Berechnung zu erkennen und eventuell zur Kontrolle Berechnungen für andere Bodenarten und Feuchtigkeitsgrade anzustellen.

Das Beispiel ist der ersten Bodenart, 107 Sandbäck, zweiter Feuchtigkeitsgrad φ_{21}, entnommen.

Bei dieser Bodenart wurden 3 spez. Wärmeversuche und 7 Wärmeleitungsversuche ausgeführt. Von den ersteren sei der der Reihe nach zweite hier beschrieben:

Spez. Wärmeversuch 107 φ_2.

Durch Wägungen wurde erhalten:

Gewicht der ganzen Probe $m = 429{,}78$ g
„ „ getrockneten Probe $361{,}85$ „
Also „ des Wassers $67{,}93$ „

$\because$ Feuchtigkeitsgrad $\varphi_2 : \frac{67{,}93}{361{,}85} = 18{,}77\ \%$.

Ferner:

Gewicht des Kalorimeters $m' = 350{,}6$ g; $o = 0{,}00024$
$\varepsilon = 0{,}11$.

Auf Grund von Beobachtungsserien, die hier weggelassen werden, und nach Form. (20) wurden bestimmt:

$\mu_0 = 0{,}176$ 1) $\mu = 0{,}0191$ $m_w = 272{,}29$ $\because c' = 0{,}09415$
2) $\mu = 0{,}01931$ $m_w = 267{,}01$ $\because c' = 0{,}09350$.

Als Mittelwert wurde angenommen

$$c' = \mathbf{0{,}0939.}$$

Der Wert μ_c ergiebt sich aus nachstehendem Beobachtungsresultat, Tab. 3.

Tab. 3.

μ-Serie für c 107 φ_2.

Uhr	a cm	lg a	lg a_i — lg a_{i+n}	Bemerkungen
5; 10	19,26	1,28465	0,36765	$\mu_0 = 0{;}176$
15	17,60	1,24550	0,36015	
20	16,10	1,20685	0,35560	$c' = 0{,}0939$
25	14,71	1,16760	0,34345	
30	13,51	1,13065	0,34105	$m'\,c' + \varepsilon = 33{,}03$
35	12,33	1,09095	0,33345	
40	11,46	1,05920	0,33330	$n = 10$
45	10,49	1,02080	0,32620	
50	9,73	0,98810	0,32535	$o = 0{,}00024$
55	8,98	0,95330	0,30985	
6; 00	8,26	0,91700	0,30530	
5	*7,68*	0,88535	0,30215	Mittl. Temp.: 3°,2
10	7,10	0,85125	0,29615	
15	6,67	0,82415	0,29525	
20	6,16	0,78960		
25	5,72	0,75740	0,3282 = Mittel	
30	5,32	0,72590		
35	4,95	0,69460	∴	
40	4,60	0,66275	**0,03282** = μ_c.	
45	4,40	0,64345		
50	4,09	0,61170		
55	3,83	0,58320		
7; 00	3,59	0,55510		
5	3,38	0,52890		

In der vierten Spalte sind die Differenzen der Werte von lg a für Zeitintervalle von 50 Min. angegeben. μ_c ist der Mittelwert dieser 14 Differenzen, reduziert auf ein Zeitintervall von 5 Minuten.

Nach Formel (21) ergiebt sich

$$c = \frac{0{,}176 \cdot 33{,}03}{0{,}03282 \cdot 429{,}78} - \frac{350{,}6}{430} \cdot 0{,}0939 = \mathbf{0{,}335}.$$

Auf dieselbe Weise erhält man: bei $\varphi_0 : c = 0{,}2093$
„ φ_∞ (37,44 %) : $c = 0{,}4294$.

Auf Grund dieser Werte sind Kurven der spez. Wärme der Bodenarten gezeichnet worden (Beispiel siehe unten S. 68). Diesen Kurven sind dann die bei den k-Berechnungen angewandten c-Werte entnommen worden.

Die fragliche Kurve ergiebt für $\varphi = 5{,}19$ % (siehe nächste Seite):

$$c\ (\varphi_{21}) = \mathbf{0{,}2575}.$$

Wärmeleitungsversuch 107 φ_{21}.

Aus Formel (15) geht hervor, dass man die Konstanten c_1 und h_1 kennen muss. c_1, d. h. die spezifische Wärme der oberen Kupferplatte bei ungef. 3° C, ist nach NERNST zu 0,0920 festgesetzt worden.

h_1 oder die äussere Wärmeleitungsfähigkeit der oberen Platte ist experimentell bestimmt worden. Die Anordnung hierbei stimmte vollkommen mit der bei einem spez. Wärmeversuch überein; der Kalorimeter wurde nur gegen die obere Kupferplatte ausgetauscht.

Resultat: μ (red. auf 5 Min.) = 0,03114,
ganze Oberfläche = 672,3 cm²,
also $h_1 = 0{,}0000562 \ \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}}$.

Da in der Regel während der Versuchsserien ungefähr der halbe Rand der Platte von dem Gummiisolierband, das eine beträchtlich grössere äussere Wärmeleitungsfähigkeit hat, bedeckt war, so ist der Wert erhöht und abgerundet worden auf:

$$h_1 = \mathbf{0{,}000058} \ \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}}.$$

Das spezifische Gewicht der Probe, ϱ, wurde nach der Formel bestimmt:

$$\varrho = \frac{M + g + \nu}{F \cdot \Delta + f \pm u}.$$

M = Gewicht der Probe.

g = Gewicht der Glasstützen = 1,51 g.

ν und f sind Korrektionsausdrücke, anlässlich des Gummiisolierbandes, bzw. 3,66 und 2,60 g.

u = Korrektion für Ausbuchtung (+), Einbuchtung (—).

Bei dem fraglichen Versuche war:

M = 309,79 g, getrocknete Probe = 294,51 g; also Wasser: 15,28 g;

$$\Delta = 0{,}5404 \text{ cm}; \quad \frac{\because \varphi_{21} = 5{,}19\ \%}{} \quad \nu, f \text{ und } u = 0;$$

$$\because \varrho = \frac{311{,}3}{170{,}6} = \mathbf{1{,}8245}.$$

Der Serienwert μ wurde aus der nachstehenden Beobachtungsserie, Tab. 4 (S. 33), erhalten.

Zur Systematisierung der Berechnung werden folgende Bezeichnungen eingeführt:

Formel (15) wird verkürzt zu:

$$\eta' \cdot \operatorname{tg} \eta' = \frac{\Delta \cdot \varrho \cdot c}{\Delta_1 \cdot \varrho_1 \cdot c_1} = \xi' \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22)$$

Der Index $'$ bei η, ξ, q und k giebt die erstmalige Berechnung (Approximation) an.

$$\Delta_1 \cdot \varrho_1 \cdot c_1 = P \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (23)$$

$$\lg P = 0{,}73602 - 1$$

$$60 \cdot \mathbf{M} = \frac{1}{p} \qquad \lg p = 0{,}58407 - 2$$

$$p \cdot \varrho \cdot c \cdot \mu = \chi \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (24)$$

Tab. 4.

μ-Serie für k 107 φ_{21}.

Bemerkungen	Uhr	a cm	lg a	$\frac{\lg a_i}{\lg a_{i+n}}$
Der Apparat wird niedergesetzt	6^h 58′; 27″			
Ablesung des Nullpunktes	59′; 15″			
	7 0; 15	19,65	1,2934	0,1618
	30	17,90	1,2529	0,1570
	45	16,14	1,2106	0,1529
n = 4	1	14,73	1,1682	0,1503
	15	13,54	1,1316	0,1552
	30	12,47	1,0959	0,1564
	45	11,42	1,0577	0,1568
$t = \frac{a}{2{,}403}$	2	10,42	1,0179	0,1558
	15	9,47	0,9764	0,1503
	30	8,70	0,9395	0,1492
	45	7,76	0,9009	0,1465
Mittl. Temp.: 1°,6	3	7,28	0,8621	0,1428
	15	6,70	0,8261	0,1404
	30	6,17	0,7903	0,1400
	45	5,68	0,7544	0,1363
μ red. auf 1 Min.	4	5,24	0,7193	0,1350
	15	4,85	0,6857	0,1318
	30	4,47	0,6503	0,1305
	45	4,15	0,6181	
	5	3,84	0,5843	
	15	3,58	0,5539	0,14717 = μ
	30	3,31	0,5198	— 183* 1,24 %
Ablesung des Nullpunktes	6′			∴ **0,14534** = μ

* Korr. für die Latenzzeit des Galvanometers; siehe Korrektionen S. 48 u. f.

$$k' = \frac{\chi}{q'^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (25)$$

$$\varkappa = \frac{h_1 F_1}{F \cdot \Delta_1 \cdot \varrho_1 c_1} \frac{\varrho \cdot c}{k' \cdot q'^2} = \beta \frac{\varrho \cdot c}{k' \cdot q'^2} = \frac{\beta \cdot \varrho \cdot c}{\chi} \quad \ldots\ldots \quad (26)$$

$$\beta = \frac{0{,}000058 \cdot 357{,}76}{315{,}73 \cdot 0{,}6672 \cdot 8{,}871 \cdot 0{,}092}.$$

$$\lg \beta = 0{,}08173 - 4.$$

Ferner Formel (15):

$$\xi = \eta \cdot \operatorname{tg} \eta = \xi' \frac{1}{1 - \varkappa} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (27)$$

$$k = \frac{\chi}{q^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (28)$$

Vor der Berechnung selbst will ich kurz angeben, wie ich zu-wege gegangen bin, um die transszendente Gleichung:

$$\eta \cdot \operatorname{tg} \eta = \xi$$

zu lösen. Es gilt nur die erste Wurzel oder die Lösung im ersten Quadranten. Ein Verfahren besteht darin, dass man η graphisch löst, und dieses Verfahren dürfte das bisher meist angewandte sein.

In Anbetracht von Schwierigkeiten, die sich hierbei einstellen, wenn man die Lösung auf 4 Dezimalstellen richtig verlangt, wie auch infolge der grossen Variationen, die ξ in allen von mir untersuchten Fällen — ungefähr 120 Lösungen — erfährt, bin ich von dieser Methode abgegangen und habe mich einer tabellarischen in folgender Weise bedient.

Man erhält:

$$\eta = \xi \cdot \operatorname{cot} \eta$$

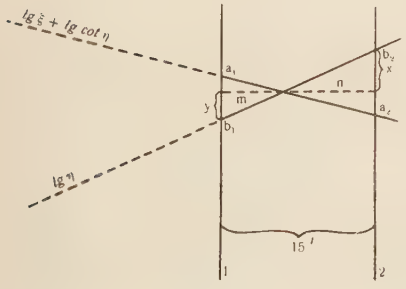
$$\because \lg \eta = \lg \xi + \lg \operatorname{cot} \eta.$$

Sodann wurde eine Tabelle von 15° bis ungef. 48° für jede 15te Winkelminute berechnet. Als Probe sei hier ein Stück von 36° bis 37° wiedergegeben.

Tab. 5.

Winkel	lg cot η	lg η	lg ξ
36°	0,13874	0,79818 — 1	0,65944 — 1
15′	13476	80119	66643
30′	13079	80417	67338
45′	12683	80714	68031
37°	0,12289	0,81008 — 1	0,68719 — 1

In der Tabelle werden die Winkel aufgesucht, zwischen denen die Lösung zu liegen scheint. Man vergleiche die beiden Beispiele auf der nächsten Seite! Der genaue Wert von lg η mit 5 Dezimalstellen, von denen nur die letzte auf eine oder ein paar Einheiten unsicher ist, wird aus Formel (29) proportioniert. Der Beweis ist der folgende:



$$\frac{y}{x} = \frac{m}{n} = \frac{a_1 - b_1}{b_2 - a_2}$$

$$x + y = b_2 - b_1$$

$$\therefore \frac{x+y}{x} = \frac{a_1 - b_1 + b_2 - a_2}{b_2 - a_2}$$

$$\therefore x = \frac{(b_2 - a_2)\,(b_2 - b_1)}{(a_1 - a_2) + (b_2 - b_1)} \quad (29)$$

Als Lösung ergiebt sich: lg $\eta = b_2 - x$ . . . . . (29 a)

In Berechnung 1) fällt lg ξ' zwischen 36°15′ und 36°30′
„ „ 2) „ lg ξ „ 36°30′ „ 36°45′.

1) Nach (22) $\xi' = \eta' \lg \eta' = \dfrac{0{,}5404 \cdot 1{,}8245 \cdot 0{,}2575}{P}$

$\lg \xi' = 0{,}73272 - 1$
$0{,}26115$
$0{,}41078 - 1$
$0{,}40465 - 1$
$\lg P \quad - 0{,}73602 + 1$
$\because \lg \xi' = 0{,}66863 - 1$
$\because \lg \eta' = 0{,}80213 - 1$
$- 0{,}73272 + 1$
$\because \lg q' = 0{,}06941$
$\because \lg q'^2 = 0{,}13882$
$\lg p \quad 0{,}58407 - 2$
$0{,}26115$
$0{,}41078 - 1$
$\lg \mu \quad 0{,}16239 - 1$

36°15'	*36°30'*
66863	66863
13476	13079
80339	79942
a_1	a_2
b_1	b_2
80119	80417

nach (29) $x = \dfrac{475 \cdot 298}{397 + 298} = 204$
695
$\because$ 80213

" (24) $\because \lg \chi = 0{,}41839 - 3$
$- 0{,}13882$
" (25) $\because \lg k' = 0{,}27957 - 3$ $\quad \because k' = 0{,}001904$

2) $\lg \beta = 0{,}08173 - 4$
$0{,}26115$
$0{,}41078 - 1$
$0{,}75366 - 5$
$- 0{,}41839 + 3$
" (26) $\because \lg \varkappa = 0{,}33527 - 2$ $\quad \because \varkappa = 0{,}02164$
$\lg \xi' = 0{,}66863 - 1$ $\quad \because 1 - \varkappa = 0{,}97836$
$- 0{,}99049 + 1$

36°30'	*36°45'*
67814	67814
13079	12683
80893	80497
a_1	a_2
b_1	b_2
80417	80714

" (27) $\because \lg \xi = 0{,}67814 - 1$
$\because \lg \eta = 0{,}80621 - 1$
$- 0{,}73272 + 1$
$\because \lg q = 0{,}07349$
$\because \lg q^2 = 0{,}14698$
$0{,}41839 - 3$
$- 0{,}14698$
" (28) $\because \lg k = 0{,}27141 - 3$
$\because k = 0{,}001868(1)$

$x = \dfrac{217 \cdot 297}{396 + 297} = \ldots . 93$
693 $\quad \because$ 80621

Korrektion (Lorberg) 1,2 % — 22. $\quad \because k$ (korr.) = **0,001846**.

Ich gehe nun dazu über, die Resultate für die verschiedenen Bodenarten in Tabellen und Kurven nebst kurzgefassten Beschreibungen und Analysen mitzuteilen.

Die Kurven für die Wärmeleitungsfähigkeit und den Feuchtigkeitsgrad sind auf den Seiten 58 u. 59 zusammengestellt.

3. **107 Sandbäck.**

Moräne, reich an Kaolin von einem zerstörten Kaolinlager her. Molehm von Sandbäck im westlichen Blekinge.

Farbe: (in trockenem Zustande) gelblichweiss.

Trocken spez. Gewicht: { bei lockerer Lagerung: $\varrho = 0{,}957$, bei fester Packung: $\varrho = 1{,}45$.

Eigenschaften bei Behandlung: lässt sich leicht zerreiben; lässt sich leicht zu homogener Mischung anfeuchten; ist überhaupt leicht zu behandeln.

Analyse: Mech. Zusammensetzung.

Sand	2—0,2 mm	42,1 %		
Mo	0,2—0,02	22,7	Fliessgrenze[1]	24
Schluff	0,02—0,002	20,8	Ausrollgrenze	21
Ton	< 0,002	11,7	Plastizitätszahl also	3
Humus		—	Festigkeitszahl (bei trockener Form)	14
Hygrosk. Wasser in lufttrockener Substanz		1,6		

In nachstehender Tabelle 6 finden sich sämtliche *Resultate* zusammengestellt. Die Spalte "korr. *k*" giebt die Endresultate an.

---

[1] Fliessgrenze, Ausrollgrenze usw. sind Begriffe, die seit verhältnismässig kurzer Zeit in die Bodenlehre eingeführt worden sind. Siehe darüber Näheres bei A. Atterberg, Int. Mitteil. f. Bodenkunde, I, S. 10. 1911—1912.

107 Sandbäck. Tab. 6.

lg $P = 0{,}73602 - 1$ lg $\beta = 0{,}08173 - 4$

Feuchtigkeitsgrad in %		l	ϱ	c	μ	k	**korr. k**	Bemerkungen
		0,4742	1,2113	**0,2093**	0,048446	0,000485	**0,000491**	locker gepackt; $u = -1{,}3$ %
φ_0	0,0	0,4813	1,411	„	0,06074	0,000633	**0,000633**	fest „ $u = 0$
φ_{21}	5,19	0,5404	1,8245	0,2575	0,14534	0,001868	**0,001846**	feste Form*; $u = 0$
φ_2 (c)	18,77			**0,335**				
φ_2	20,08	0,5570	1,9689	0,342	0,2895	0,004138	**0,00409**	"Kitt" $u = -1{,}1$ %
φ_{43}	29,35	0,4747	1,7994	0,391	0,30377	0,003620	**0,00367**	Teig od. dicker Brei; $u = -1{,}4$
φ_4	34,65	0,4751	1,8664	0,416	0,29812	0,003623	**0,00364**	"Brei" † $u = -1{,}25$
φ_∞ (c)	37,44			**0,4294**				
φ_∞	38,34	0,4945	1,8084	0,4315	0,2625	0,003347	**0,00336**	flüssig † $u = -1{,}5$
φ_m	19,05			0,336			**0,00410**	

Die kursivierten c-Werte sind direkt aus den Kalorimeterversuchen gefundene Werte; die anderen sind der hiernach gezeichneten Kurve entnommen.

In der letzten Spalte unter "Bemerkungen" wird die Ursache der Korrektion angegeben: Ausbuchtung (+) oder Einbuchtung (—) in % von F. Im ersteren Fall ist die Korrektion negativ, im letzteren positiv. Siehe weiteres hierüber Kap. V, Punkt 3. Unter dem Strich wird schliesslich derjenige Feuchtigkeitsgrad, bei dem k sein Maximum erreicht, und der entsprechende c-Wert angegeben.

4. 235 Sandbäckshult.

Sauer reagierender, schwach humoser Molehm von Sandbäckshult, Ålem socken, Südl. Län Kalmar.

Farbe (in trockenem Zustand): braun oder hellbraun.

Trocken spez. Gewicht: { bei lockerer Lagerung: $\varrho = 0{,}831$, bei fester Packung: $\varrho = 1{,}10$.

* Bei diesem Versuch war das Gummiband weggenommen; korrigiert nach Lorberg mit — 1,2 %. Siehe Punkt 6 u. 8. V.

† Korrigiert nach Lorberg mit — 0,8 %.

Eigenschaften bei Behandlung: lässt sich leicht zerreiben;
lässt sich leicht zu homogener Mischung anfeuchten;
nimmt viel Wasser auf, wird bei Feuchtigkeitsbehandlung "fett" und blank an der Oberfläche; ermangelt der Plastizität; bekommt beim Trocknen leicht Sprünge.

Analyse:

Sand	2—0,2 mm	22,6 %		
Mo	0,2—0,02	26,3	Fliessgrenze	45
Schluff	0,02—0,002	20,9	Ausrollgrenze	0
Ton (= feiner Schluff, arm an wirklichem Ton)		21,5	Plastizitätszahl	0
Humus		6,0	Festigkeitszahl	4
Hygrosk. Wasser		2,1		

Die *Resultate* sind aus nachstehender Tabelle 7 ersichtlich.

235 Sandbäckshult. Tab. 7.

φ-Grad in %	Δ	ϱ	c	μ	k	**korr.** k	Bemerkungen
φ_0 0,0	0,4804	1,0747	**0,230**	0,03455	0,0003409	**0,000341**	trocken; $u = 0$
φ_{21} 23,52	0,4911	1,5726	0,408	0,11645	0,001401	**0,00139**	nahezu fest*; u — 0,45 %
φ_2 (*c*) 34,21			**0,456**				
φ_2 34,70	0,4904	1,711	0,4575	0,17941	0,002256	**0,00226**	"Kitt" u — 0,25
φ_3 44,70	0,4773	1,6384	0,4865	0,18483	0,002260	**0,00224**	dicker Brei†; u 0
φ_4 59,46	0,4753	1,555	0,5145	0,16886	0,002052	**0,00206**	flüssig† u — 1,3 %
φ_∞ (*c*) 60,51			**0,517**				
φ_m 38,1			0,4685			**0,00230**	

5. 117 Kosta.

Moschlufflehm, Gärtonbildung, unter Moor bei der Glashütte Kosta, Län Kronoberg, liegend.

Farbe (in trockenem Zustand): hellgrau.

* Ohne Gummiisolierband. Lorbergs Korr. — 1,2 %.

† Lorbergs Korrektion — 0,8 %.

Trocken spez. Gewicht { bei lockerer Lagerung: $\varrho = 0{,}956$, bei fester Packung: $\varrho = 1{,}42$.

Eigenschaften bei Behandlung: lässt sich ohne Schwierigkeit zu einem feinen, mehlartigen Pulver zerreiben; lässt sich leicht zu homogener Mischung anfeuchten; nimmt bei höherem Wassergehalt Luft in feinverteiltem Zustand auf, Konsistenz wie "zerrührte Butter", wird aber doch bei relativ niedrigem Wassergehalt (träge) flüssig; trocknet langsam unter unbedeutendem Zerspringen.

Analyse:

Sand	2—0,2 mm	0,7 %
Mo	0,2—0,02	36,2
Schluff	0,02—0,002	43,6
Ton	< 0,002	18,8
Humus		—
Hygrosk. Wasser in luftt-rockener Substanz		0,7

Fliessgrenze	21
Ausrollgrenze	0
Plastizitätszahl	0
Festigkeitszahl	10

Die *Resultate* finden sich in nachstehender Tabelle 8 zusammengestellt.

117 Kosta. Tab. 8.

φ-Grad in %	Δ	ϱ	c	μ	k	korr. k	Bemerkungen
φ_0 0,0	0,4791	1,3906	**0,202**	0,044056	0,0004465	**0,000447**	trocken; $u = 0$
φ_{210} 7,42	0,5039	1,8470	0,256	0,14171	0,001683	**0,001666**	feste Form*; $u = -0{,}2$ %
φ_{21} 10,30	0,5036	1,8905	0,277	0,16420	0,001979	**0,001953**	nahezu fest;* $u = 0{,}15$ „
φ_2 18,93	0,5018	2,0386	0,329	0,23095	0,002906	**0,00285**	"Kitt" $u = +1{,}96$ „
φ_2 (c) 23,34			**0,353**				
φ_3 29,20	0,4775	1,8536	0.381	0,23699	0,002839	**0,00285**	"Brei"† $u = -1{,}2$ „
φ_∞ (c) 37,50			**0,415**				
φ_∞ 38,41	0,4754	1,8323	0,419	0.2309	0,002795	**0,00283**	dickflüssig†; $u = -2{,}15$ „
φ_m 23,0			0,352			**0,00288**	

6. 381 Ekerum.

Schwere Tonschwarzerde von Ekerums gård, südlich von Borgholm, Öland.

Farbe (in trockenem Zustand): braun, ins Grüne spielend.

* Ohne Gummiisolierband. Lorsbergs Korr. — 1,2 %.

† Lorbergs Korr. — 0,8 %.

Spez. Gew. (in trockenem Zustand) { bei lockerer Lagerung: $\varrho = 0{,}954$, bei fester Packung: $\varrho = 1{,}305$.

Eigenschaften bei Behandlung: lässt sich mit Schwierigkeit zu einem feinen, talkigen Pulver zerreiben, das in völlig trockenem Zustand bei Umrühren leicht stäubt; lässt sich mit Schwierigkeit mit Wasser zu einer homogenen Teige mischen; nimmt viel Wasser auf; nach besonders ausgeführter Feuchtigkeitsprobe 117 % Wasser, um flüssig zu werden; nimmt leicht Luft auf — "zerrührte Butter" ; trocknet sehr langsam, wobei Sprünge auftreten; klebt an Geräten und Werkzeugen fest und ist überhaupt schwer zu bearbeiten.

Analyse:

Stein und Kies (wird abgesondert)	5,1 %
Sand	6,6
Mo	11,6
Schluff	21,5
Ton	43,4
Humus	8,9
Hygrosk. Wasser	2,9

Fliessgrenze nicht beurteilt
Ausrollgrenze „ „
Plastizitätszahl recht hoch
Festigkeitszahl „ „

Die *Resultate* sind in nachstehender Tabelle 9 enthalten.

381 Ekerum. Tab. 9.

lg $P = 0{,}73630 - 1$ lg $\beta = 0{,}08143 - 4$

Grad in %	Δ	ϱ	c	μ	k	korr. k	Bemerkungen
0,0	0,4813	1,2837	**0,235**	0,04508	0,000463	**0,000463**	trocken $u = 0$
39,50	0,4860	1,5854	0,4475	0,13983	0,001700	**0,00168**	nahezu fest* $u = 0$
52,09	0,4966	1,701	0,4925	0,17284	0,002239	**0,00220**	
56,2			**0,503**				"Kitt" † $u = + 0{,}9$ %
65,25	0,4760	1,583	0,527	0,17527	0,002155	**0,00218**	Teigform
68,1			**0,535**				"zerrührte Butter" †; $u = - 2{,}0$ „
85,22			**0,552**				dickflüssig
57,0			0,507			**0,00224**	

7. 123 Svedala.

Oberflächenton von der Ziegelei Svedala in Schonen. Äusserst schwerer Ton.

Farbe (in trockenem Zustand): hellbraun bis grau.

Spez. Gew. („ „) { bei lockerer Lagerung: $\varrho = 1{,}043$, bei fester Packung: $\varrho = 1{,}435$.

Eigenschaften bei Behandlung: unerhört schwer zu zerreiben; schwer mit Wasser zu einem homogenen Teige zu mischen; nimmt viel Wasser bis 104 % auf, um flüssig zu werden; hat überhaupt die Eigenschaften der vorigen Bodenart, aber in noch höherem Grade.

Analyse:

Sand	1,3 %		
Mo	10,9	Fliessgrenze	46
Schluff	38,1	Ausrollgrenze	23
Ton	41,0	Plastizitätszahl	23
Humus	1,6	Festigkeitszahl	74
Hygrosk. Wasser in luft-trockener Substanz	5,8		

Die *Resultate* sind in nachstehender Tabelle 10 enthalten.

123 Svedala. Tab. 10.

φ-Grad in %		Δ	ϱ	c	μ	k	korr. k	Bemerkungen
φ_0	0,0	0,4817	1,414	**0,230**	0,04942	0,0005144	**0,000514**	trocken; u 0
φ_{01}	9,32	0,4844	1,456	0,297	0,07598	0,0008382	**0,000825**	luftfeucht bis zur Sättigung; $u = +1{,}6$ %
φ_{21}	34,13	0,4843	1,6414	0,434	0,09756	0,001172	**0,001160**?	feste Form* u 1,0 „
φ_2 (c)	41,25			**0,467**				
φ_2	46,03	0,4771	1,780	0,483	0,16794	0,002082	**0,00203**	Teigform* u 1,0 „
φ_3 (c)	60,06			**0,532**				
φ_3	66,24	0,4838	1,583	0,544	0,15964	0,002012	**0,00200**	„Brei“ † u 0,3 „
φ_∞	85,2	0,4769	1,504	0,589	0,15957	0,001988	**0,00198**	flüssig † u −0,75 „
φ_∞ (c)	85,4			**0,587**				
φ_m	50,3			0,499			**0,00209**	

8. Torestorpsmossen.

Sehr gut vermoderter Wald-(Birkenflachmoor-)Torf mit etwas Birkenholz und -rinde von Torestorpsmossen (Eisenbahnstation Bratteborg), Län Jönköping.

Farbe (in trockenem Zustand): fast schwarz.

Spez. Gew. („ „) { bei lockerer Lagerung: $\varrho = 0{,}454$, bei fester Packung: $\varrho = 0{,}652$.

Eigenschaften bei Behandlung: lässt sich zu einem leichten Pulver zerreiben, das bei Umrühren stäubt; lässt sich mit Wasser unter Anwärmen leicht zu einer homogenen Mischung verrühren; sehr hygroskopisch, nimmt in gesättigter Luft bis zu 20,6 % Wasser auf und braucht das doppelte Gewicht Wasser, um Sättigung oder flüssige Konsistenz zu erreichen; trocknet sehr langsam; ermangelt gleich der nächsten und letzten Bodenart, Flahult, jeder Art von Plastizität; klebt nicht an Geräten und Werkzeugen und ist sehr leicht zu bearbeiten.

Die angewandte Probe ist aus 0,5 m Tiefe entnommen.

Analyse: Extraktion mit 12 % Salzsäure.

Organische Stoffe	90,38 %
Eisenoxyd und Tonerde	3,11
Kalk	1,09
Kali	0,03
Phosphorsäure	0,08
Schwefelsäure	0,11
Ungelöste und nicht bestimmte Stoffe	5,20
	100,00
Stickstoff	2,46

Mikroskopische Untersuchung: Hauptmasse: Humusklumpen; ausserdem Holz- und Rindenfragmente von Betula reichlich; möglicherweise etwas Holz von Alnus; spärlich zerstreute Sandkörner; Radizellen von Carex sp. vereinzelt; Pollen von Pinus silvestris, Betula, Alnus und möglicherweise Corylus Avellana; Sporen; Eihüllen von Nephelis.

Die *Resultate* sind in nachstehender Tabelle 11 zusammengestellt.

Torestorpsmossen. Tab. 11.

φ-Grad in %		Δ	ϱ	c	μ	k	korr. k	Bemerkungen
φ_0	0,0	0,4882	0,6604	**0,367**	0,02199	0,0002087	**0,00021**	trocken; $u = 0$
φ_{210}	56,43	0,4836	0,7616	0,547	0,042822	0,0004554	**0,000450**	feste Form*; $u = 0$
φ_{21}	76,58	0,4838	0,8574	0,604	0,05255	0,0005833	**0,000575**	weich* $u = + 0{,}15\ \%$
φ_2	107,0	0,4863	1,0044	0,686	0,06749	0,0007999	**0,000798**	nass $u = + 0{,}3$
φ_2 (*c*)	129,2			**0,733**				
φ_3	135,0	0,4749	1,104	0,741	0,08272	0,0009932	**0,000988**	weicher Teig†; $u = - 0{,}2$
φ_3 (*c*)	143,3			**0,755**				
φ_∞ (*c*)	169,8			**0,737**				
φ_∞	195,1	0,4753	1,117	0,750	0,08227	0,0009932	**0,000990**	flüssig† $u = - 0{,}5\ \%$

9. Flahult.

Torferde aus dem Granarper Moor bei Flahult, Län Jönköping (Eisenbahnstation Smålands Taberg). Probe aus 0,5 m Tiefe entnommen.

Makroskopische Untersuchung: Fast unvermoderter Sphagnumtorf mit reichlichen Wurzeln von Eriophorum vaginatum sowie vereinzelten Wurzeln von Calluna vulgaris.

Mikroskopische Untersuchung: Hauptmasse: Blätter, Stämme und Sprossteile von Sphagnum sp.; ausserdem spärlich zerstreute Radizellen von Ericacéen (cfr. Calluna); vereinzelte Radizellen von Carex sp.; Pollen von Picea excelsa und Pinus silvestris; Sporen; Eihüllen von Nephelis.

Farbe in trockenem, feinverteiltem Zustand: (hell)braun.

Spez. Gew. „ „ { bei lockerer Lagerung: $\varrho = 0{,}080$ / bei fester Packung: $\varrho = 0{,}22$.

Eigenschaften bei Behandlung: lässt sich mit Schwierigkeit zu mehr oder weniger feinverteiltem Zustand kardieren; die Teilchen von sehr variierender Grösse; in äusserst hohem Grade hygroskopisch; nimmt Wasser (leicht unter Erwärmen) bis zu mehr als dem Zehnfachen des Gewichts in trockenem Zustande an; die angefeuchtete Mischung, die nicht einmal bei Sättigung in fliessenden Zustand eintritt, ist schwer homogen zu erhalten; trocknet sehr langsam unter starkem Schrumpfen.

Analyse:

Organische Stoffe	98,35 %
Eisenoxyd und Tonerde	0,15
Kalk	0,22
Kali	0,08
Phosphorsäure	0,04
Schwefelsäure	0,11
Ungelöste und nicht bestimmte Stoffe	1,05
	100,00
Stickstoff	0,79

Die *Resultate* sind in nachstehender Tabelle 12 enthalten.

Flahult. Tab. 12.

p-Grad, direkt		Δ	ϱ	c	μ	k	korr. k	Bemerkungen
p_0	0,0	0,4947	0,20985	**0,443**	0,014457	0,0001222	**0,000122**	trocken *; $u = 0$
p_1	2,39	0,5058	0,7557	0,918	0,04979	0,0006150	**0,000614**	$u = + 0{,}2$ %
p_2 (c)	3,245			**0,971**				
p_2	4,69	0,4853	0,9902	0,961	0,08438	0,001082	**0,00108**	$u = + 0{,}4$
p_3 (c)	5,75			**0,944**				
p_3	~ 6,305	0,4774	1,0295	0,939	0,09427	0,001196	**0,00120**	$u = 0$
p_∞	~ 7,76	0,4781	1,0302	0,940	0,09525	0,001212	**0,00122**	gesättigt; $u = - 0{,}5 \sim$ %
p_∞ (c)	8,01			**0,940**				

* Mit schmalem Gummiisolierband versehen.

KAP. V.

Fehlerquellen und Korrektionen.

1. Der Packungsgrad.

Die Bodenpräparate sind im allgemeinen so fest wie möglich hineingestopft worden, um in dieser Hinsicht dem natürlichen Zustande möglichst nahe zu kommen. Bei den trockenen Proben hat der Packungsgrad eine recht grosse Bedeutung. Um dies genauer festzustellen, wurde an 107 Sandbäck ein Versuch mit lockerer gepackter Probe angestellt; siehe Tab. 6. Die spezifischen Gewichte verhielten sich zu einander wie 0,858 : 1; die inneren Wärmeleitungsfähigkeiten standen in einem Verhältnis wie 0,766 : 1, also eine bedeutend grössere Differenz, proportional genommen.

Bei allen Bodenproben in trockenem Zustande ist daher in möglichstem Masse derselbe Packungsgrad erstrebt worden; bei den feuchten dagegen spielt dieser Gesichtspunkt keine wichtigere Rolle, weshalb hier diese Fehlerquelle, praktisch gesehen, vernachlässigt werden kann.

2. Die Glasstützen.

Die bei den Bodenversuchen angewandten Glasstützen sind aus praktischen Gründen recht dick genommen worden. Ihre Gesamtbasisfläche hat 1,27 cm^2, d. h. 0,403 % von F betragen. Da Glas eine Wärmeleitungsfähigkeit von 0,0011—0,0018 $\frac{cal}{cm \cdot sec \cdot grad}$ hat, ein Wert also, der dem Mittelwert der für die Bodenproben erhaltenen nahekommt, so dürfte auch diese kleine Fehlerquelle als bedeutungslos angesehen werden können.

3. Die u-Korrektion.

Es hat sich nicht vermeiden lassen, dass bei dem Füllen des Apparats mit den trockenen und halbfeuchten Proben in der Regel eine Ausbuchtung über den Rand hinaus entstand, gleichwie eine Einbuchtung bei den flüssigen Proben. Diese Aus- oder Einbuchtung habe ich indessen zu berechnen versucht. Diese Korrektion ist, wie aus den Tabellenresultaten hervorgeht, in % von F ausgedrückt worden. Bei ihrem in der Regel niedrigen Wert — bei Kosta und Ekerum hat sie jedoch 2 % oder etwas mehr betragen — habe ich k nach dem Ausdruck korrigieren zu können geglaubt:

$$k \text{ (korr.)} = k \left[1 - \frac{u}{100} \right].$$

4. Das Thermoelement.

Ein Thermoelement ist stets mit einer gewissen Trägheit insofern behaftet, als es erst eine gewisse Zeit nachher die Temperatur zeigt, die in einem bestimmten Augenblick gemessen werden soll. Ich habe besondere Untersuchungen an dem von mir verwendeten Thermoelement ausgeführt, um festzustellen, ob seine Trägheit möglicherweise auf die μ-Werte einwirken könnte. Diese mehr speziellen Versuche ergaben, dass die Trägheit bei den Wärmeleitungsversuchen auf die μ-Werte keine solche Wirkung ausübte, dass sie nicht als innerhalb der Fehlergrenzen im übrigen liegend angesehen werden konnte.

Im Zusammenhang mit diesen Versuchen konnte ich konstatieren, dass die untere Kupferplatte nach einer Zeit von ca. 2 Minuten, nachdem der Apparat auf das Eisstück niedergesetzt worden war, die Temperatur 0°, wie die Theorie es fordert, angenommen hatte.

5. Die Latenzzeit des Galvanometers.

Jeder Galvanometer leidet in grösserem oder geringerem Grade an einem ähnlichen Fehler, wie er soeben für das Thermoelement erwähnt worden ist, obwohl in höherem Grade. Der angewandte Galvanometer, der aperiodisch war, brauchte ungefähr 20 Sekunden, um während eines Ausschlages zu vollständiger Ruhe zu kommen.

Es war also notwendig zu untersuchen, wie diese Latenzzeit in erster Linie auf die μ-Werte einwirkte.

Durch besondere Versuche ist es mir mittelst einer direkten Methode, die eine Korrektion allein für diese Latenzzeit, unabhängig von dem Thermoelement, ermöglicht, gelungen, die fragliche Korrektion in Prozenten des μ-Wertes bei all den verschiedenen rasch verlaufenden Wärmeleitungsserien zu bestimmen.

Die Anordnung, dieselbe wie bei der Bestimmung der Empfindlichkeit und Proportionalität des Galvanometers, war die folgende.

Der Galvanometer, G, wird, mit starkem Nebenschluss versehen, einem Normal-Milliamperemeter vorgeschaltet, siehe nachstehende Figur 2. r war ein Rheostat für Einheiten bis hinab zu 0,1 Ω; R ein Nebenschluss von 0,008 Ω; E ein Akkumulator von 2 Volt; W ein regulierbarer Widerstand; *N. M-A-M.* war das oben erwähnte Normalinstrument Hartman & Braunscher Fabrikation.

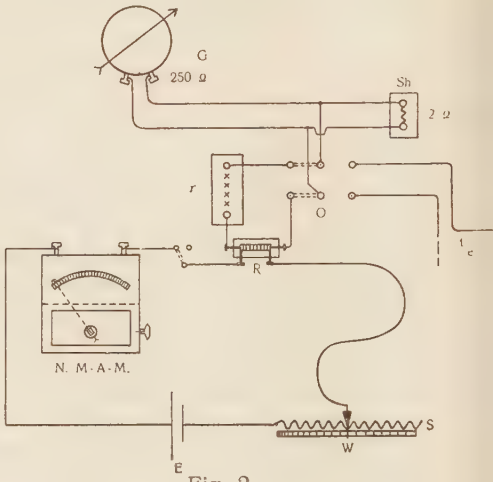


Fig. 2.

Die Widerstandssumme $r+R$ wurde als gleich der des Thermoelementkreises, t_e, bestimmt, gleich 4,66 Ω.

An dem Regulierungswiderstand W war eine Skala, S, angebracht, die in der Weise graduiert war, dass jeder Strich einen Ausschlag an G, entsprechend einer Ablesung in einer bestimmten "natürlichen" Beobachtungsserie, bedeutete.

Auf diese Weise konnte eine "künstliche" Beobachtungsserie mit für die verschiedenen Serien wechselndem Zeitintervall hergestellt werden. Während eines solchen Versuches wurde W so reguliert, dass bei gewissen markierten Ticken der Sekundäruhr der Index ↓ einen Teilstrich passierte. Gleichzeitig[1] wurde G und *N. M-A-M.* abgelesen. Nehmen wir an, das Zeitintervall τ_0 betrug 15 Sek. Dadurch, dass dann aus den beiden so erhaltenen Beobach-

[1] Ich benutze die Gelegenheit, hier meine Dankbarkeit Herrn Privatdozenten Dr. C. Bergholm zu bezeugen, der mir in wohlwollender Weise bei den Ablesungen dieser Versuchsserien behilflich gewesen ist.

tungserien die μ-Werte berechnet wurden, die dieselben sein würden, wenn der Galvanometer keine Latenzzeit hätte, wurde die Korrektion prozentisch bestimmt. So wurde z. B. bei dem genannten τ_0 (= 15″) erhalten:

μ (Galvanometer) = 5025,

μ (Milliamperemeter) = 4959, also eine Korrektion von 1,32 %. In derselben Weise wurde mit τ_0 10 Sek. (2 Serien), 20 Sek. und 30 Sek. verfahren. Die Korrektionen waren der Reihe nach:

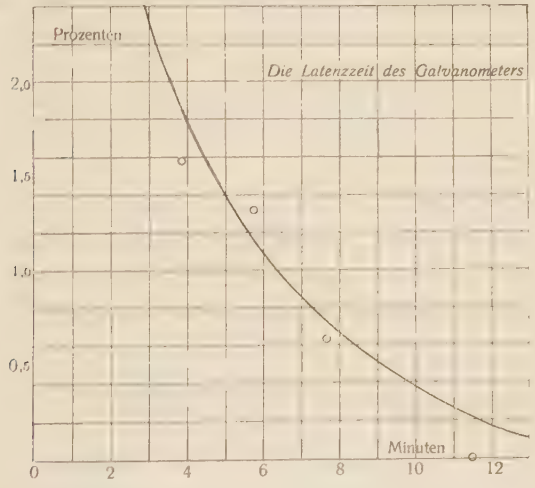
1,58 % 1,32 % 0,637 % und 0 %.

Sodann wurde eine Kurve konstruiert, indem als Abszissenwerte die summierte Zeit der Serien: $(n - 1)\ \tau_0$ [n = 24 = Anzahl Ablesungen] und als Ordinatenwerte die Korrektionen in %, wie soeben angegeben, abgetragen wurden. Die entsprechenden Abszissenwerte waren bzw.:

3′,83 5′,75 7′,67 und 11′,5.

Die Kurve hatte das nachstehende Aussehen:

Taf. I.



Dieser Kurve konnte dann die Korrektion für jede beliebige "natürliche" Beobachtungsserie entnommen werden, wenn nur die Dauer der Beobachtungsserie berechnet wurde. So z. B. war in dem von mir oben durchgerechneten Beispiel, 107 Sandbäck φ_{21}, μ unkorrigiert = 0,14717; als Dauer der Serie ergab sich 5,5 Min., also nach der Kurve die Korrektion 1,24 %, d. h. μ korr. = 0,14534. Hierbei ist zu beachten, dass der Anfang und das Ende der Serie

durch dieselben absoluten Ausschläge, die ungefähr $19{,}6 - 3$ cm gewesen sind, markiert werden.

Diese Korrektion hat in einem Falle, 107 φ_{43} und φ_4, bis zu $2{,}34$ % betragen, was offenbar die Notwendigkeit der Korrektion beweist. Es ist ohne weiteres vorausgesetzt worden, dass der angewandte Normal-Milliamperemeter keine Latenzzeit im Vergleich mit dem Galvanometer aufwies.

Bei Untersuchungen, die zuvor von H. F. Weber und anderen, die sich seiner Methode bedient haben, angestellt worden sind, ist meines Wissens dieser Korrektion keine Aufmerksamkeit gewidmet worden. Unter dieser Voraussetzung dürften also ihre Werte für k, die den μ-Werten proportional sind, mehr oder weniger zu hoch sein.

6. Das Gummiisolierband.

Mit wenigen Ausnahmen ist die Lamelle mit einem grauen Gummiisolierband, wie es bei elektrischen Installierungsarbeiten u. dgl. angewandt wird, umgeben worden. Da es von einem gewissen Interesse war, die Wärmeleitungsfähigkeit dieses Bandes zu kennen, bestimmte ich dieselbe gleichfalls mittelst der Weberschen Methode und in demselben Apparat.

Gummibänder wurden zugeschnitten und dicht neben einander in doppelten Reihen gelegt, wobei die Lamelle natürlich viel dünner ausfiel als bei den Bodenartversuchen. Das Resultat war das folgende.

c wurde nach Landolt und Börnstein zu $0{,}38$ angenommen.

$$\Delta = 0{,}0703 \qquad \lg \xi' = 0{,}84292 - 2$$
$$\varrho = 1{,}421 \qquad \therefore \lg \eta' = 0{,}41645 - 1$$
$$\mu = 0{,}1745$$
$$\therefore \quad k = \mathbf{0{,}00026.}$$

Also ein Wert, der nur den vierten Teil desjenigen des Glases und etwas über die Hälfte des Wertes bei gewöhnlichen trockenen Bodenarten ausmacht. Die trockenen Torfböden, besonders Flahult, zeigen allerdings einen noch niedrigeren Wert, bis hinab zu $0{,}00012$, welcher Wert nur ganz unbedeutend die Wärmeleitungsfähigkeit der Watte übersteigt, die ja zu den schlechtest leitenden porösen Stoffen, die wir kennen, gehört.

Ich kann also ruhig behaupten, dass das Gummiisolierband keine Fehlerquelle mit sich bringt; eher hat es in günstigem Sinne gewirkt und gewisse Übelstände behoben: 1) infolge seiner schlechten Wärmeleitung als ein "Schutzring" gewirkt und 2) die Dampfbildung vom Rande der Lamelle aus vermindert.

Wie bereits in dem Kapitel über die Theorie erwähnt worden, verhält es sich nämlich so, dass die Grösse h bei der WEBER'schen Berechnung keine Berücksichtigung findet. Es bedingt dies einen Fehler, der um so grösser wird, je grösser Δ ist. Δ betrug bei meinen Versuchen gegen 0,5 cm. Fügt man hierzu die Dampfbildung vom Rande her bei allen feuchten Proben, so hat man vielleicht eine Fehlerquelle, die nicht ohne weiteres vernachlässigt werden darf.

Die Dampfbildung oder die Verdunstung habe ich indessen durch Wägungen berechnen können.

Nimmt man $\Delta = 0{,}48$ an, so erhält man als Randfläche der Lamelle: $\pi \cdot 20{,}05 \cdot 0{,}48 = 30{,}5$ cm^2.

Es sei ferner die Dampfbildungswärme für Wasser bei + 4° 605 cal. Die Wägungsangaben z. B. für 123 Svedala zeigen folgende Gewichtsverminderung:

φ_{01}	0,02 g	in	30	Min.	$\therefore$ 0,00065 $\frac{g}{sec}$,	$\therefore$	0,000118	$\frac{cal}{cm^2 \cdot sec}$
φ_{21} *	0,87 „		128	„	0,0068 „		0,00225	„
φ_2 *	0,58 „		49	„	0,0118 „		0,00392	„
φ_∞	0,13 „		44	„	0,00296 „		0,00098	„

Hieraus ist zweierlei deutlich ersichtlich: 1) spielt der Feuchtigkeitsgrad eine wichtige Rolle; φ_∞ giebt beinahe 10 mal so viel Wärme ab als φ_{01}; 2) vermindert das Gummiisolierband wesentlich die Verdunstung; bei φ_2, ohne Band, ist die Verdunstung ungefähr 4 mal so gross wie bei φ_∞, mit Band.

Die Verdunstung von der Randfläche her, die ich mit h_r bezeichnen will, ergiebt also einen bedeutend grösseren Wärmeverlust pro sec und cm^2 als die äussere Wärmeleitung h_1 die oben zu 0,000058 bestimmt worden ist.

Diese Umstände haben mich veranlasst, der Frage näher zu treten, ob die WEBER'sche Theorie, die auf h und h_r keinerlei Rücksicht nimmt, hinreichende Genauigkeit gewährt.

7. Spätere Wasserversuche.

Um in dieser Frage Gewissheit zu erlangen, habe ich, nachdem die Versuche mit den Bodenarten abgeschlossen worden, zwei Wärmeleitungsversuche mit Wasser mit grösstmöglicher Genauigkeit ausgeführt.

Von diesen späteren Wasserversuchen, die mit verschiedenen Werten von Δ und mit Gummiisolierband längs dem ganzen Rande angestellt wurden, seien hier nur die Resultate wiedergegeben.

Wasserversuch 4.	$\Delta = 0{,}3205$	$\lg \xi' = 0{,}76956 - 1$	$\therefore k = 0{,}001210$
	$\mu = 0{,}15272$	$\lg \eta' = 0{,}84468 - 1$	
Wasserversuch 5.	$\Delta = 0{,}4785$	$\lg \xi' = 0{,}94379 - 1$	$\therefore k = 0{,}001240$
	$\mu = 0{,}097313$	$\lg \eta' = 0{,}93377 - 1$	

Mittelwert: $k = \mathbf{0{,}001225}$.

An diesen Resultaten fällt sofort die wenig gute Übereinstimmung ins Auge; die Werte weichen vom Mittelwertum mehr als 1 % ab; aber die Verschiedenheit bewegt sich in der zu erwartenden Richtung, denn Versuch 5 muss natürlich mit seinem bedeutend breiteren Rande einen grösseren Wärmeverlust von demselben her als Versuch 4 und somit einen höheren k-Wert aufweisen.

Die h-Werte seien hier noch etwas genauer ziffernmässig angegeben. Es sei $h_r \gtrsim$ das für 123 φ_∞ gefundene, also 0,0010; es sei ferner $h = 0{,}000070$, so erhält man als resultierenden Wärmeverlust am Rande pro sec und cm²

$$h + h_r = 0{,}00107 \text{ cal.}$$

8. Lorberg's Korrektionen.

H. Lorberg (Wied. Ann. XIV, 291 u. 308, 1881) hat den Weber'schen Wärmeleitungsversuch einer erneuten theoretischen Behandlung unterzogen, indem er von etwas strengeren Grundannahmen ausging, und er ist dabei zu einer komplizierteren Endformel gelangt. Die wichtigsten Punkte, die L. behandelt, und die in diesem Zusammenhange Erwähnung verdienen, sind:

1) die Bedeutung der Dicke der unteren Platte für deren Isothermalität;

2) die Bedeutung der Randwirkung;

3) die Berechnung von μ und dessen Korrektion.

Die beiden ersten Punkte machen sich auch in der Endformel geltend, da in dieselbe sowohl die Dicke Δ_2 der unteren Platte als auch der Wert h eingehen (siehe unten). Der dritte Punkt ist eine mehr freistehende theoretische Prüfung, bei der L. von einer konstanten Temperaturdifferenz zwischen der Unterseite der unteren Platte und der Temperatur der Hülle auf der Innenseite ausgeht. Diese letztere Korrektion resultiert in einer wesentlichen Erhöhung des μ-Wertes und also auch des k-Wertes, wie auch aus Tabelle 2, S. 28, hervorgeht.

Es dürfte für den fraglichen Zweck genügen, den Vergleich nur mit LORBERG's Formel durchzuführen und demnach Punkt 3) unberücksichtigt zu lassen.

LORBERG's Formel hat folgendes Aussehen, wobei ich mir erlaubt habe, einen Teil der Bezeichnungen in Übereinstimmung mit den oben angewandten zu ändern.

$$k = \zeta \frac{\Delta^2 \cdot \mu \cdot p}{\eta^2} \cdot \frac{1}{N\mu p\left[\left(\frac{2}{R}+\frac{1}{\Delta_1}\right)\frac{h_1}{\zeta_1}+\frac{1}{3}\mu p\Delta_1\frac{h_1}{k_1}+(N-1)\frac{2}{R}\cdot\frac{h}{\zeta}\right]}{1-\Delta_1{}^2\frac{\zeta_1}{k_1}\cdot\frac{\mu p}{N}\left[\frac{1}{3}+\delta\left(1+\frac{\xi^2}{\eta^2}\right)\right]},$$

wo $\zeta = \varrho \cdot c$ $\zeta_1 = \varrho_1 \cdot c_1$

$$\xi = \frac{\Delta \cdot \varrho \cdot c}{\Delta_1 \cdot \varrho_1 \cdot c_1} \qquad N = \frac{1+\xi}{2}+\frac{\eta^2}{2\xi} \qquad \delta = \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$$

η = 1:ste Wurzel der Gleichung: $\eta \cdot \operatorname{tg} \eta = \xi$.

Mittelst dieser Formel und des oben bestimmten Wertes des resultierenden $h = 0{,}0107$ habe ich die k-Werte für die beiden letzterwähnten Wasserversuche umgerechnet. Als Resultat ergab sich:

Wasserversuch 4. Mittl. Temp.: 1°,55.

$$k = 0{,}001231\,\frac{1-0{,}01702}{1-0{,}004340} = 0{,}001231\,[1-0{,}019] = \mathbf{0{,}001208}.$$

Wasserversuch 5. Mittl. Temp.: 1°,64.

$$k = 0{,}001273\,\frac{1-0{,}03836}{1-0{,}003078} = 0{,}001273\,[1-0{,}0353] = \mathbf{0{,}001228}.$$

Mittelwert: 0,001218.

Wir sehen hier, dass LORBERG's Formel, wie zu erwarten, die Werte in bessere Übereinstimmung mit einander bringt, so dass die Abweichung von dem Mittelwert auf nur 0,83 % reduziert ist.

Es ist also festzustellen, dass bei WEBERS Wärmeleitungsversuchen, sofern grössere Genauigkeit verlangt wird, und besonders wenn Δ einigermassen gross und der Rand gegen Verdunstung ungeschützt ist, die LORBERG'sche Formel einen richtigeren Ausdruck für k liefert als die einfachere von WEBER angegebene.

Diese Korrektion ist mithin von Bedeutung für meine k-Werte bei den feuchten Bodenarten, besonders denjenigen, bei denen der Rand nicht durch Gummiisolierband geschützt war, und dürfte um 1 % herum betragen. Bei den letzteren Bodenarten, die in den Tabellen mit einem Sternchen (*) bezeichnet worden sind, ist eine derartige reduktive Korrektion von 1,2 % durchgeführt worden, desgleichen bei den zwei feuchtesten Proben, φ_3 oder φ_4 und φ_∞, mit 0,8 % (diese letzteren sind mit † bezeichnet). Ich komme im nächsten Abschnitt noch auf diese Sache zurück.

9. Die Genauigkeit und die Fehlergrenzen.

Im Zusammenhang mit einer generellen Behandlung der Fehlergrenzen soll hier die Frage behandelt werden, wie ein Fehler bei der Bestimmung des c-Wertes auf den schliesslichen k-Wert einwirkt.

Indem man in wohlbekannter Weise die folgenden, aus (22), (24) und (25) erhaltenen Formeln:

$$\left.\begin{aligned} \xi' &= \eta' \operatorname{tg} \eta' = \frac{\Delta \cdot \varrho \cdot c}{\Delta_1 \cdot \varrho_1 \cdot c_1} \\ k' &= p \frac{\varrho c \mu \Delta^2}{\eta^2} \quad \ldots \ldots \end{aligned}\right\}$$ (Index ′ bei ξ η k kann hier weggelassen werden)

logarithmisch differenziert,
erhält man:

$$\frac{d\xi}{\xi} = \frac{d\eta}{\eta} + \frac{d\eta}{\sin \eta \cos \eta} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (a)$$

Ferner: $$k = p \cdot \xi \cdot \mu \Delta \Delta_1 \varrho_1 c_1 \cdot \frac{1}{\eta^2}.$$

Führen wir nun die Bezeichnung ein:

$$\vartheta = \mu \Delta \Delta_1 \varrho_1 c_1 .$$

so erhalten wir:

$$\frac{dk}{k} = \frac{d\xi}{\xi} + \frac{d\vartheta}{\vartheta} - 2\frac{d\eta}{\eta} = \frac{d\vartheta}{\vartheta} + \left[\frac{1}{\sin\eta\cos\eta} - \frac{1}{\eta}\right] d\eta \quad \ldots\ldots (b)$$

Aus Formel (*b*) geht hervor, dass Fehler bei μ proportional auf den *k*-Wert einwirken; dagegen nicht Fehler bei Δ, Δ_1, ϱ_1 und c_1. Von diesen können Fehler bei Δ, Δ_1 und ϱ_1 sehr klein gemacht werden, c_1 setzt aber einer genauen Bestimmung gewisse Schwierigkeiten entgegen. [Ich habe mich genötigt gesehen, diesen Wert der Konstantenlitteratur der jüngsten Zeit mit Rücksicht auf hartgewalztes Kupfer und eine Mitteltemperatur von 3° zu entnehmen.] Ferner, und das ist hier besonders wichtig, wirkt ein Fehler bei ϱ oder c in bedeutend geringerem Grade ein, wie sogleich bewiesen werden wird. Hierbei kann von ϱ abgesehen werden, da hier der Fehler sehr stark vermindert werden kann. Es bleibt also der Fehler bei c übrig.

Mit Hilfe meiner Tabellen, von denen Tab. 5 auf S. 35 eine Probe darstellt — dasselbe erhält man auch leicht aus Formel (*a*) — habe ich unter der Voraussetzung, dass $d\eta$ 15 Bogenminuten entspricht, berechnet, dass innerhalb des angewandten Gebietes 16°—47° die folgenden Verhältnisse gelten:

zwischen 16° und 16°15′ ist $\frac{d\eta}{\eta} = 0{,}4619\frac{d\xi}{\xi}$,

„ 46°45′ und 47° „ $\frac{d\eta}{\eta} = 0{,}4239\frac{d\xi}{\xi}$;

Also nach (*b*)

$$\frac{dk}{k} = (\text{bzw.}) \begin{cases} 0{,}0762 \\ 0{,}252 \end{cases} \times \frac{d\xi}{\xi} \text{ oder } \frac{dc}{c}.$$

Ein Fehler bei c von beispielsweise 5 % wirkt demnach auf den *k*-Wert nur mit einem Bruchteil davon, d. h. mit einem Betrage ein, variierend zwischen 1,25 % und 0,38 %.

Hieraus geht ferner hervor, dass der Fehler bei *k*, der von Fehlern bei ϱ und c abhängt, in demselben Masse herabgepresst wird, als es sich um niedrigere Winkelgrade handelt, d. h. mit ξ abnimmt. Mit anderen Worten, je kleiner ξ ist, um so mehr tendiert der Wärmeleitungsversuch, aus einem solchen mit variablem Temperaturzustand in einen mit stationärem Zustand überzugehn.

Hieraus kann man folgenden allgemeinen Schluss ziehen:

Bei Verwendung der Weber'schen Lamellenmethode zur Bestimmung der inneren Wärmeleitungsfähigkeit wird die grösste Genauigkeit und die grösstmögliche Unabhängigkeit von Fehlern bei der Bestimmung der spezifischen Wärme und des spezifischen Gewichts des fraglichen Stoffes erhalten, wenn die oben erwähnte Quantität ξ so klein als möglich gemacht, d. h. die Lamelle so dünn wie möglich, die obere Kupferplatte dagegen dick genommen wird, vorausgesetzt, dass hierdurch nicht die Genauigkeit bei den anderen wichtigen Beobachtungsfaktoren (μ und Δ) herabgesetzt wird.

Die Anwendung einer kalorimetrischen Methode, der Abkühlungsmethode, mit der ich bei diesen Bodenuntersuchungen gearbeitet habe, ist demnach, wenn sie auch nicht allen Ansprüchen an Genauigkeit in erwünschtem Grade genügen kann, doch völlig motiviert.

Die resultierenden Fehler oder Fehlergrenzen bei den erhaltenen Wärmeleitungswerten dürften somit folgendermassen geschätzt werden können. Ein Fehler von einigen Prozent bei der spezifischen Wärme c hat in der Regel auf den Endwert mit höchstens 0,5 % eingewirkt, und fügt man hinzu die Fehler bei μ, Δ, Δ_1 und den Randfehler, so dürfte der endgiltige Maximalfehler für eine Bestimmung um 1 % herum liegen, möglicherweise in einigen Fällen ½ % höher. Hierzu kommt der Fehler bei c_1, über dessen Grösse, absolut genommen, sich unmöglich etwas aussagen lassen dürfte; doch hat er stets in *derselben* Richtung gewirkt und in unbedeutendem Grade die k-Werte in ihrem gegenseitigen Verhältnis beeinflusst.

KAP. VI.

Diskussion der Ergebnisse. Kritik. Schlussfolgerungen.

1. Allgemeines über die Ergebnisse.

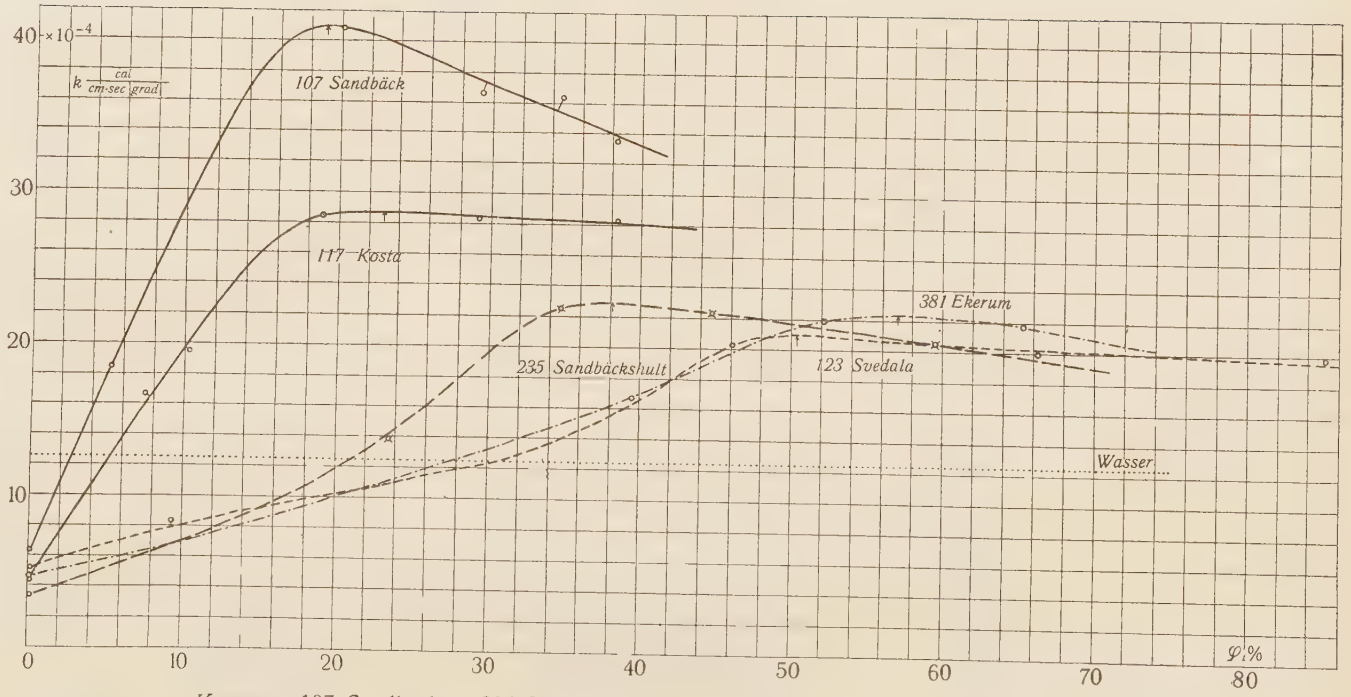
Die in Kapitel IV tabellarisch wiedergegebenen Resultate sind graphisch auf den folgenden Seiten 58 und 59 auf zwei Kurventafeln dargestellt, wobei die fünf ersten Bodenarten auf der einen, die übrigen, die Torfböden, auf der anderen Tafel vereinigt worden sind; die Kurven auf den beiden Tafeln sind in verschiedenem Massstab gezeichnet, was durch die wesentlich verschiedenen Feuchtigkeitsverhältnisse der Bodenarten bedingt ist.

Alle Bodenarten stimmen darin überein, dass sie in trockenem Zustande eine sehr niedrige Wärmeleitungsfähigkeit aufweisen, die mehr oder weniger rasch bei steigendem Feuchtigkeitsgehalt auf um ein Vielfaches höhere Werte anwächst. In nachstehender Tabelle 13 sind die wichtigsten Ergebnisse zum Vergleich zusammengestellt.

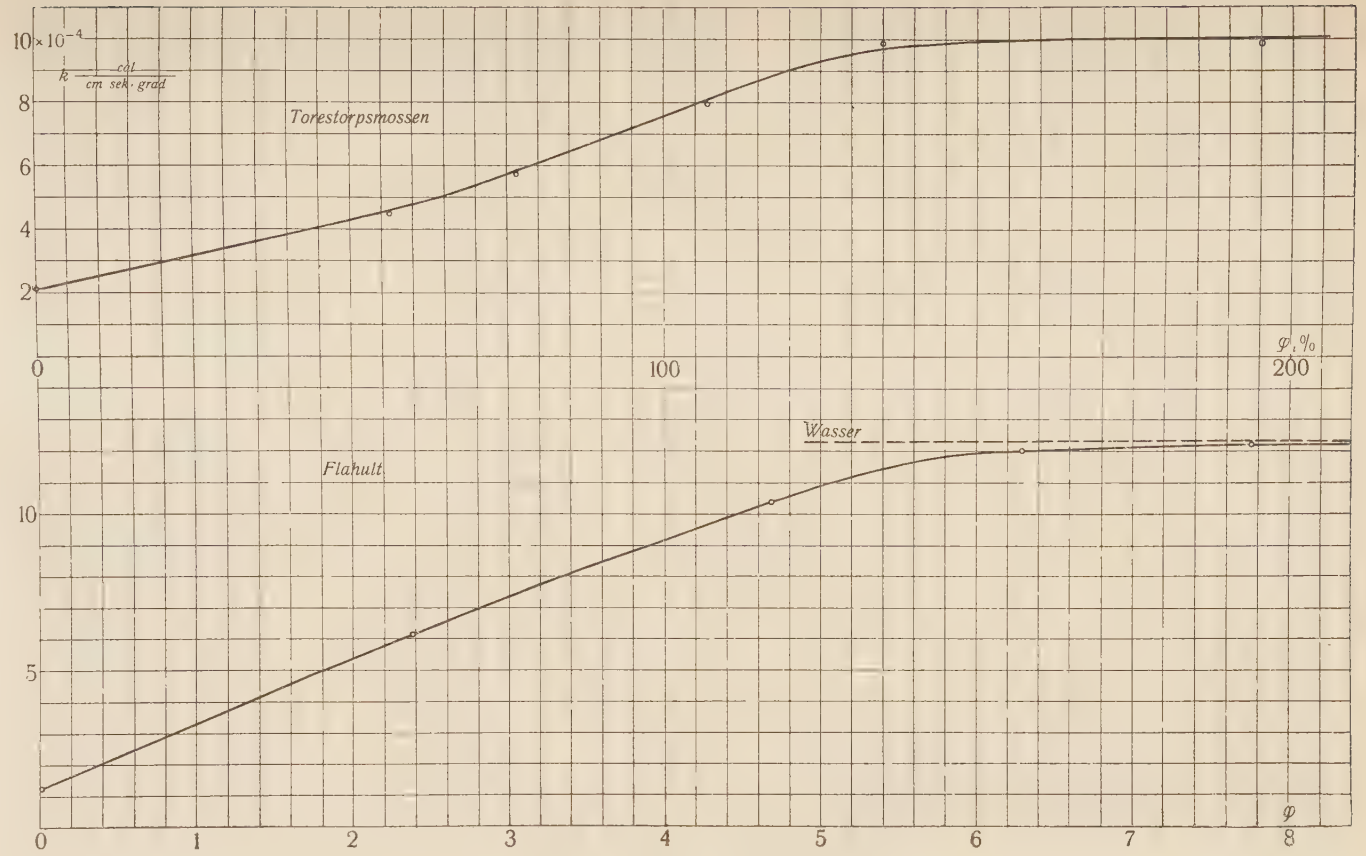
Tab. 13. *Vergleichende Übersicht über die Resultate.*

Bodenart	*107*	*235*	*117*	*381*	*123*	*Ttm*	*Fht*
$k_m \times 10^5$	410	230	288	224	209	99	122
$k\varphi_0 \times 10^5$	63,3	34,1	44,7	46,3	51,4	21	12,2
k_m / k_{φ_0}	6,5	6,75	6,45	4,84	4,07	4,7	10,0
φ_m %	19,05	38,1	23,0	57,0	50,3	(164)	—
ϱ_m	2,02	1,717	2,046	1,68	1,790	1,12	1,018
ϱ_{φ_0}	1,408	1,063	1,386	1,277	1,410	0,644	0,190

Kurventafel II.



Kurven. 107 Sandbäck. 235 Sandbäckshult. 117 Kosta. 381 Ekerum. 123 Svedala.



Kurven. Torestorpsmossen. Flahult.

Diese Zusammenstellung zeigt zunächst, dass das Wärmeleitungsverhältnis grösser ist bei den sand-, mo- und schluffreicheren Bodenarten als bei den eigentlichen Tonen und dem vermoderten Torfboden; die unvermoderte Flahulter Probe zeigt eine in die Augen fallend hohe Ziffer.

Ferner sieht man (vgl. die Analysenangaben), dass die maximale Wärmeleitungsfähigkeit, k_m, am grössten bei der an wirklichem Sand reichsten Bodenart 107 ist und dann gleichzeitig mit dem Prozentsatz an Mosand, d. h. im grossen und ganzen mit der dominierenden Korngrösse abnimmt. Analog hiermit sollte der Torfboden vom Torestorpsmossen äusserst feine Partikeln in wesentlichem Grade enthalten.

Ein Blick auf die Kurven auf S. 58 lässt sogleich eine wichtige Übereinstimmung zwischen ihnen erkennen: *die Wärmeleitungsfähigkeit erreicht ihr Maximum k_m weit vor der Sättigung mit Feuchtigkeit, um dann bei noch weiter gesteigertem Wassergehalt mehr oder weniger deutlich abzunehmen.* Der Feuchtigkeitsgrad bei diesem Maximum, q_m, variiert, wie man sieht, nach der Regel, dass q_m und k_m einander umgekehrt proportional sind.

Es muss auch ganz natürlich erscheinen, dass die Wärmeleitungsfähigkeit bei grossem Wassergehalt, da für das Wasser $k = 123$ (rel. Mass) ist, sinken und bei unendlicher "Verdünnung" sich diesem Wert nähern muss.

Bei den spezifisch leichten Torfböden liegt die Sache anders. Bei dem Torestorpsmossen kommt es gar nicht zur Ausbildung eines Maximums, obwohl ein solches bei ungefähr 150 % eine Tendenz zeigt hervorzutreten. Die Kurve für Flahult zeigt einen gleichmässigeren Anstieg und nähert sich asymptotisch dem Werte des Wassers, den sie nahezu erreicht.

2. **Abweichungen.**

Bei der Behandlung der Fehlerquellen und Korrektionen im vorigen Kapitel erwähnte ich zum Schluss etwas über die wahrscheinliche Fehlergrenze. In einigen vereinzelten Fällen, die deutlich aus den Kurven hervorgehen dürften, scheint jedoch diese eine erhebliche Erweiterung zu erfahren, was seinen Grund in den Schwierigkeiten haben muss, die sich bei der Feuchtigkeitsbehandlung ergeben. Besonders in die Augen fällt ein Wert bei der sehr schwerzubehandelnden Bodenart 123 Svedala und bei 107 Sandbäck (q_{13}).

3. Kritik der Untersuchungen KARSTEN's.

Bevor ich auf eine Erklärung der starken Steigerung der λ-Werte eingehe, will ich jedoch die in der geschichtlichen Übersicht zuletzt referierte Arbeit von KARSTEN einer näheren Prüfung unterziehen. Ihm kommt das Verdienst zu, zuerst durch eine systematische Untersuchung die starke *Steigerung* der Wärmeleitungsfähigkeit bei Bodenarten mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt nachgewiesen zu haben, wie sie ja durch meine eigenen Resultate vollständig bestätigt wird. Eine andere Übereinstimmung zwischen unseren Ergebnissen besteht auch betreffs der trockenen Proben, wobei ich besonders an die Bodenarten: 3 Lehm, 4 sandhaltiger Lehmboden und 5 Moorboden bei KARSTEN (siehe die geschichtliche Übersicht) denke.

Hiermit ist es aber auch mit der Übereinstimmung zu Ende. In der oben in der geschichtlichen Übersicht gegebenen Tabelle über KARSTEN's Ergebnisse machen sich keinerlei Spuren von Maxima bemerkbar, auch scheint der blosse Gedanke daran dem Verfasser völlig fern gelegen zu haben, da er seine empirische Formel vorschlägt, die bei Vermehrung der Wassermenge, z. B. 2—3 mal so viel Wasser wie Trockensubstanz (d. h. $\varphi = 200$—$300\,\%$), zu vollkommenem Widersinn führt. Meinte der Verfasser, dass der vorgeschlagene Ausdruck nur bis zu einer gewissen Feuchtigkeitsgrenze angewandt werden darf, so hätte er dies doch wohl irgendwie andeuten müssen. Meines Erachtens kann diesem Ausdruck trotz seiner vielen Konstanten keine allgemeingiltige Bedeutung zuerkannt werden.

Ferner sei darauf hingewiesen, dass KARSTEN's auf rein mathematischer Grundlage aufgebaute Formel für die Wärmeleitungsfähigkeit bei Kügelchen zwischen zwei unter einander parallelen Ebenen bei von Luft oder von Luft und Wasser ausgefüllten Zwischenräumen — in der geschichtlichen Übersicht oben nicht erwähnt, siehe die Originalabhandlung — auch nicht einmal approximative Anwendung auf feuchte Erde besitzt. Die wahrscheinliche Ursache hierfür werde ich im Folgenden berühren.

Schliesslich seien noch einige Worte über die von KARSTEN angewandte CHRISTIANSEN'sche Lamellenmethode gesagt. Diese Methode ist nicht gerade als besonders sicher bekannt, und obwohl KARSTEN unstreitig eine wesentliche Verbesserung bei derselben durch seine "Mischer" eingeführt hat[1], sind damit doch keineswegs *alle* Fehler-

[1] H. KARSTEN, Undersökning af den Christiansen'ska apparaten. Öfvers. af Finska Vet. Soc. Förh., L A. 7. 1908/1909.

quellen behoben. Es würde zu weit führen, die Kritik auf die fragliche Methode auszudehnen, es sei nur bemerkt, dass, wenn man einigermassen sichere Resultate mittelst derselben erhalten will, die Anordnung so kompliziert wird, dass sie in dieser Hinsicht der WEBER-schen nicht weit nachsteht, und absolute Werte werden trotzdem nicht erhalten.

Man kann sich der Annahme nicht entziehen, dass KARSTEN's fehlerhafte *k*-Werte bei höherem Wassergehalt durch methodische Fehler verursacht sein müssen, die nicht zu vermeiden gewesen sind.

Ausserdem hat er unnötigerweise seine Werte auch mit einem kleineren systematischen Fehler belastet, indem er den Temperaturkoeffizienten, besonders bei Wasser, vollständig vernachlässigt hat, und obwohl dieser Koeffizient bis auf den heutigen Tag nicht sicher bekannt ist, dürfte doch der dadurch bedingte Fehler sich konsequent auf 7—8 % Erhöhung belaufen.

Auch ist ja zu bemerken, dass die mittleren Temperaturen für die Messungen mittelst geeigneter Vorkehrungen innerhalb eines Intervalls von höchstens 1—2° hätten gehalten werden können und nicht, wie die Tab. 1 in der geschichtlichen Übersicht zeigt, innerhalb des Gebiets 4°—11° hätten variieren dürfen. Bei meinen Messungen betragen die Differenzen vom Mittelwert 1°,6 nur ein oder ein paar Zehntelgrade.

4. Der Temperaturkoeffizient für die Wärmeleitungsfähigkeit feuchter Bodenarten.

Es wäre wünschenswert gewesen, dass die vorliegende Untersuchung auch auf die Wärmeleitung bei einer oder einigen anderen Temperaturen ausgedehnt worden wäre, so dass man sich eine Vorstellung von der Beschaffenheit des Temperaturkoeffizienten bei den verschiedenen Bodenarten hätte bilden können. Den Gedanken an diese Vervollständigung der Behandlung des Gegenstandes habe ich leider aufgeben müssen, da die Realisierung desselben eine vollständige Umänderung der Anordnungen nötig gemacht hätte. Ich möchte jedoch in diesem Zusammenhange betonen, wie wichtig und interessant es sein würde, den Verlauf der Wärmeleitung bei einer feuchten Bodenart, z. B. Ton, zu studieren, wenn die Temperatur das Gebiet 0° bis —6° o. —8° und umgekehrt passiert, wobei das Bodenfrostphänomen eine neue physikalische Beleuchtung erhalten würde.

5. Theoretisches.

Oben unter 3. ist erwähnt worden, dass KARSTEN's mathematische Formeln weder dazu genügen, die Variation der Wärmeleitung mit dem Feuchtigkeitsgrade auszudrücken noch den Wert der Wärmeleitung in einem bestimmten Falle zu berechnen, wenn man die geometrischen Faktoren und die Wärmeleitungsfähigkeit der einzelnen Komponenten Erde, Luft und Wasser je für sich kennt.

Ich möchte nun hier die Frage erheben: was kann die Ursache der starken Steigerung der Wärmeleitungsfähigkeit von k_{90} bis k_m sein? Schon v. LITTROW (a. a. O., siehe die geschichtl. Übers.) betont, dass die Erdsubstanz selbst ein besserer Leiter ist als Wasser. Es liegt da die Annahme nahe, dass dieselbe eine recht hohe Wärmeleitungsfähigkeit besitzt, dass aber, wie auch v. LITTROW annimmt, in trockenem pulverförmigem Zustand die Luft in den Zwischenräumen die Wärmeleitungsfähigkeit wesentlich herabdrückt. Werden dagegen die Poren mit Wasser ausgefüllt, das ja, besonders im Verhältnis zu Luft, relativ gut leitet, so wäre durch den auf diese Weise in der ganzen Masse auftretenden Brückeneffekt die Erklärung für die Steigerung bei Feuchtheit gegeben.

Es kann wohl nicht bestritten werden, dass *einige* Wahrheit in dieser einfachen Überlegung liegt, aber beiweitem nicht die ganze; dazu ist die "Erklärung" allzu schematisch und der wirkliche natürliche Verlauf allzu kompliziert. Gehen wir zuerst etwas näher auf die Frage nach der Korngrösse und dem Porenvolumen ein. Wären die Bodenpartikel sphärisch und gleichgross, so wäre nach einer elementaren mathematischen Berechnung $\frac{\text{Porenvolumen}}{\text{ganze Volumen}}$ konstant, also unabhängig von dem Radius der Partikeln ($1 - \frac{\pi}{6} = 0{,}4764$).

Das ist indessen bei einer Bodenart nicht der Fall. WOLLNY (Forsch. a. d. Geb. d. Agr. Physik, Bd. VIII, S. 368; 1886) hat das Porenvolumen für verschiedene Sandsortierungen berechnet. Er fand:

Sortierung	2—1	mm	38,2	Volumprozent
„	1—0,5	„	39,1	„
„	0,5—0,25	„	40,6	„
„	0,25—0,17	„	41,3	„
„	0,17—0,11	„	43,6	„
„	0,11—0,07	„	46,9	„
„	0,07—0,01	„	47,9	„

Hieraus geht hervor, dass das Volumprozent bei abnehmender Korngrösse steigt, um ungefähr bei 0,01 mm Durchmesser sein Maximum zu erreichen. Hat man dagegen eine Probe, bestehend aus einer Menge verschieden grosser Partikeln, wie z. B. die Bodenarten 107, 235 und 117 hier oben, so muss das Porenvolumen abnehmen, vielleicht sogar unter das niedrigste der oben angeführten, weil ein ganzer Teil der feinsten Körner sich zwischen die gröberen lagert. Bei den eigentlichen Tonen dagegen, die Sand und Mo so gut wie ganz entbehren, 381 und 123, muss das Porenvolumen bedeutend höher, vielleicht bei 40—45 %, liegen. Von hier aus käme man zu dem bereits angedeuteten Schluss, dass der Partikelstoff selbst eine sehr hohe Wärmeleitungsfähigkeit besitzen müsste. Das dürfte jedoch nicht der Fall sein. Einige Zahlen zeigen dies:

Tab. 14. Natürliche Gesteine.

Gestein	Temperatur	Autor	k
Marmor (weiss)	unter 0°	Forbes	0,00115
Feldspat	18 – 74	Ayston u. Perry	0,0055
Granit	—	H. F. Weber	0,0075
Gneis	0	R. Weber	0,00057
Schiefer	unter 0	H. F. Weber	0,00081
Gips, natürl.	0	R. Weber	0,0031
Kreide		Herschel, Lebedew u. Dunn	0,0022
Kieselstein	51 – 82	Ernst	0,00313

Nehmen wir von diesen typischen Gesteinen den Granit aus, so haben wir beim Feldspat einen k- Wert, der nicht sonderlich hoch ist (recht unbedeutend k_m für 107 Sandbäck übersteigend), und ferner bei Gneis, Marmor (Kalkstein) und Schiefer, deren Verwitterungsprodukte in Bodenarten oft vorkommen, durchweg *niedrigere* Wärmeleitungsfähigkeit als bei Wasser[1] nach Tab. 14. Diesen Zahlen darf man nicht allzu hohe Beweiskraft beimessen, wäre aber übrigens die fragliche Ursache hohe Wärmeleitungsfähigkeit der Kornsubstanz selbst gewesen, so hätte unbedingt KARSTEN mit seiner mathematisch abgeleiteten Formel, gegen die bei den gemachten Grundannahmen kein eigentlicher Einwand erhoben werden kann, Werte erhalten, die wenigstens approximativ richtig gewesen wären. Hieraus kann ich nur den Schluss ziehen, dass *bei Bodenarten mit natürlicher*

[1] $k = 0{,}0012$ bei 0°.

Kornsortierung Korngrösse, Porenvolumen und Wärmeleitungsfähigkeit in einem gewissen Verhältnis zu einander stehen, so dass grössere Korngrössen Hand in Hand gehen mit kleinerem Porenvolumen und sowohl grösserer Wärmeleitungsfähigkeit k als auch grösserem Wärmeleitungsverhältnis k_m/k_{q_0}, sowie dass eine hohe Wärmeleitungsfähigkeit der Kornsubstanz selbst kaum dazu ausreicht, die starke Zunahme bei k zu erklären.

Will man zu einer Erklärung gelangen, so ist man daher gezwungen, die Hauptursache für die starke Steigerung des k-Wertes bei vermehrtem Wassergehalt anderswo zu suchen, und ich habe geglaubt, dieselbe *in gewissen physikalischen oder, genauer ausgedrückt, molekular-kapillaren Eigenschaften des Wassers selbst bei dessen Vorhandensein in den Zwischenräumen zwischen den Partikeln* zu finden.

Eine kräftige Stütze für meine Ansicht, dass die Ursache bei dem Porenwasser zu suchen ist, liefern Untersuchungen, die auf dem kapillaren Gebiet von LAGERGREN[1] ausgeführt worden sind, welcher Forscher eine völlig genügende und als richtig erwiesene Erklärung für das seit langem bekannte, aber bis dahin unerklärte Phänomen "Benetzungswärme" gegeben hat[2]. Diese Wärmetönung soll auf einer kräftigen Verdichtung der Flüssigkeit durch den porösen Körper beruhen. Sich ferner stützend auf Versuche, die von JOULE[3] über den Wärmeeffekt bei isentropischer Kompression von Wasser angestellt worden sind, sowie auf kalorimetrische Messungen von CHAPPUIS[4] über die Benetzungswärme bei feinem Kohlepulver, kommt LAGERGREN durch Berechnung zu dem Resultat, dass der Druck, der erforderlich wäre, um diesen Wärmeeffekt zu erzielen, sich auf *6150 Atmosphären* belaufen müsste.

Ich gebe in diesem Zusammenhange eine Berechnung des maximalen *spezifischen Gewichts* einer meiner Bodenarten wieder, auf das ich im Folgenden bald zurückzukommen haben werde. Das Beispiel ist der Probe 107 Sandbäck entnommen, bei welcher das spezifische Gewicht für $\varphi = 19$ (19,05) experimentell als 2,0 (2,02) befunden worden war. Ich nehme an, dass bei diesem Feuchtigkeitsgrad das Wasser gerade die Poren ausfüllt und das spez. Gewicht 1 hat, und will nun das spez. Gewicht ϱ_m des Bodenpräparats

[1] S. LAGERGREN, Bih. t. K. Svenska Vet.-Akad. Handl., Bd. 24, II, 5, 1899.

[2] Ein Erklärungsversuch gemacht u. a. von BUNSEN, Wied. Ann. **24**, S. 385; 1885.

[3] JOULE, Phil. Trans. **149**, S. 135; 1859.

[4] CHAPPUIS, Wied. Ann. **19**, S. 21; 1883.

berechnen. Das spez. Gewicht der trockenen Probe (mit Luft in den Poren) ist zu 1,4 bestimmt worden. Es seien ferner

s = das spez. Gewicht der Kornsubstanz selbst,
w = das Volumen „ „ „
V = „ „ des ganzen Präparats (φ_m).

Gewicht der trockenen Substanz = 100 g; Gewicht des Wassers = 19 g.

$$\because 1{,}40 = \frac{100}{w + 19} \qquad \because w = 52{,}4 \qquad V = w + 19$$

$$s = \frac{100}{w} \qquad \because s = \mathbf{1{,}91},$$

$$\text{ferner } \varrho_m = \frac{100 + 19}{w + 19} = \frac{119}{71{,}4} = \mathbf{1{,}67},$$

also 16,5 % niedriger als der experimentell gefundene Wert.

Das Porenvolumen ist: $\frac{19}{V} = \frac{19}{71{,}4} = 26{,}6$ %, was dem Vorhergehenden gemäss nicht unwahrscheinlich klingt. Aber ein Fehler von 16,5 % bei der Bestimmung des spez. Gewichts ist absolut ausgeschlossen. Die Grundannahme muss demnach unrichtig sein; wären die Poren nicht vollständig mit Wasser gefüllt, so würde ja ϱ_m noch niedriger ausfallen, die Abweichung also noch grösser sein; es bleibt somit nur die Annahme übrig, dass die Ansetzung des spez. Gewichts des Wassers = 1 nicht das Richtige trifft. Also: *das Wasser in einer feuchten Bodenart muss ein höheres spez. Gewicht als 1 haben.*

Analoge Berechnungen von ϱ_m bei den übrigen Bodenarten ergeben Resultate, die in dieselbe Richtung weisen.

Befindet sich dagegen das Wasser in einer feuchten Bodenart unter kapillarem oder, genauer gesagt, molekular-kapillarem "Druck" von zwischen 6000 und 7000 Atmosphären, so gestaltet sich die soeben durchgeführte Rechnung ganz anders. Ich habe Anlass zu vermuten, dass bei meinen Wärmeleitungsversuchen dieser "Druck" nicht kleiner, sondern eher grösser als der von LAGERGREN berechnete gewesen ist, wenn ich mich an die Wärmeleitungsmaxima k_m und das entsprechende φ_m halte.

Angenommen, der Kompressionskoeffizient des Wassers sei 0,000048 und unabhängig davon, wie weit die Kompression geht; nehmen wir ferner an, dass die Körner, besonders die kleineren, bei diesem grossen Druck um 10—12 % zusammengepresst werden, so erhalten wir als spez. Gewicht des "Porenwassers":

$$\frac{1}{1 - 6500 \cdot 48 \cdot 10^{-6}} = 1{,}454,$$

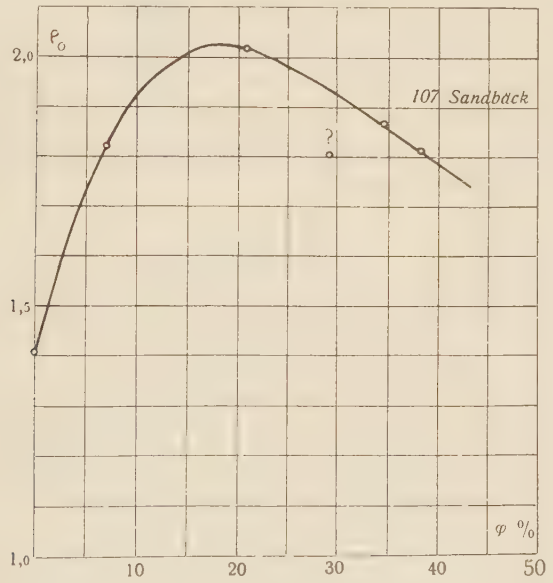
$$\therefore \varrho_m = \frac{119}{46{,}6 + \frac{19}{1{,}454}} = 1{,}995,$$

was mit dem experimentell erhaltenen durchaus übereinstimmt.

Dieser "Porendruck" bringt aber unbedingt eine Änderung gewisser anderer physikalischer Eigenschaften des Porenwassers, wie der spezifischen Wärme, ferner der Festigkeit des Präparats usw., mit sich.

Bevor ich weitergehe, gebe ich hier in einer Kurve die spez. Gewichte ϱ für die Probe 107 Sandbäck bei den bestimmten Feuchtigkeitsgraden wieder, jedoch mit den kleinen Korrektionen, die dadurch bedingt sind, dass hier die Wirkung der Glasstützen und des Gummiisolierbandes abgerechnet wird.

Spez. Gewicht. Taf. IV.



Wir sehen da zunächst, dass ϱ sehr rasch ansteigt und ein Maximum bei demselben Feuchtigkeitsgrad φ_m erreicht, bei welchem die Wärmeleitungsfähigkeit ihr Maximum hat. [Das Herausspringen des Punktes φ_{13} aus der Kurve hat seine Erklärung in dem etwas abweichenden Anfeuchtungsverlauf.]

Derartige Kurven habe ich für sämtliche Bodenarten konstruiert und als allgemeine Regel gefunden, dass *die Maxima der Wärmeleitungsfähigkeit bei denselben Feuchtigkeitsgraden auftreten wie die Maxima des spezifischen Gewichts.*

Diese wichtige Eigenschaft des Porenwassers bei feuchten Bodenarten ist wohl völlig hinreichend, um das abweichende Resultat bei Berechnung nach KARSTEN's theoretischer Formel zu erklären, denn steigt das spez. Gewicht des Wassers um 50 %, so dürfte dessen Wärmeleitungsfähigkeit auch eine wesentliche Veränderung erfahren.

Ich komme nun zu der spezifischen Wärme. Es erweckte schon frühzeitig während dieser Untersuchung meine Aufmerksamkeit, dass die spezifische Wärme c bei verschiedenen Feuchtigkeitsgraden bei einer Bodenart nicht der gewöhnlichen Mischungsformel:

$$c = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \ldots}{m_1 + m_2 + \ldots}$$

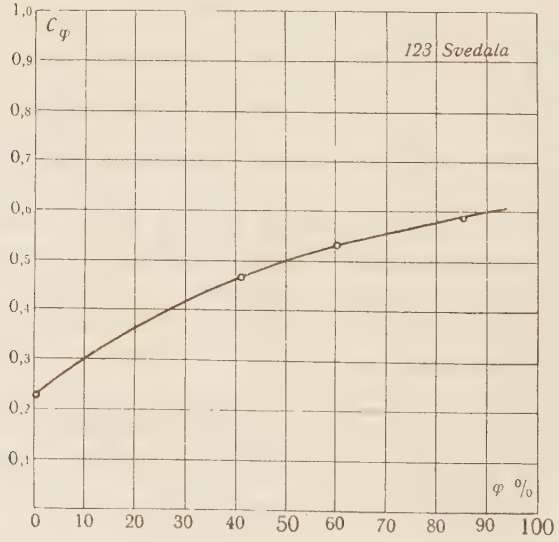
folgte. Die Abweichung hiervon machte sich besonders bei den schweren Tonböden und den Torfböden geltend.

Wenn wir nämlich hier von der Mischungskomponente Luft absehen und die spez. Wärme des Wassers = 1 setzen, so kann, wenn c = spez. Wärme der trockenen Probe, bei der angewandten Bezeichnung für den Feuchtigkeitsgrad q, diese Grösse, c_q, folgendermassen ausgedrückt werden:

$$c_q = \frac{100\ c + q}{100 + q}\ .$$

Die nachstehende Kurve zeigt c_q für 123 Svedala.

Spez. Wärme. Taf. V.



Ich habe diese Bodenart deshalb gewählt, weil die Abweichung hier besonders typisch ist, und ferner weil die Genauigkeit hier eine der grössten unter den c-Versuchen ist, da 4 Punkte der Kurve bestimmt worden sind.

Die Resultate finden sich auch in nachstehender Tabelle zusammengestellt.

123 Svedala.

φ	c_φ graphisch	c_φ ber.	Bemerk.
10	0,300	0,300	$c = 0{,}230$
20	0,360	0,358	
30	0,414	0,408	
40	0,461	0,450	
50	0.498	0,487	
60	0,532	0,518	$\varphi_m = 50{,}3$
70	0,554	0,547	
80	0,577	0,573	
90	0,599	0,595	

Wir sehen also, dass die Abweichung ihr Maximum ungefähr bei φ_m erreicht, und dass die experimentell erhaltenen Werte höher sind als die nach der Mischungsformel berechneten. Diese Richtung in der Abweichung ist durchgehend für alle untersuchten Bodenarten, möglicherweise mit Ausnahme von Probe 107 Sandbäck, deren Abweichung von der Formel unsicher ist.

Eine Erklärung dafür zu geben, weshalb die Abweichung gerade in diese Richtung geht, ist aus vielerlei Gründen schwer. Mehrere Faktoren können hierbei einwirken; die spez. Wärme des Porenwassers kann sich gleichzeitig mit der spez. Wärme der Kornsubstanz ändern; über die spez. Wärme des Wassers bei Drucken bis hinauf zu mehreren 1000 Atmosphären liegen meines Wissens keine Untersuchungen vor, und im übrigen erlaubt es der Grad von Genauigkeit, der bei den Untersuchungen über die spez. Wärme zur Anwendung kam, nicht, bestimmte quantitative Schlüsse zu ziehen.

Was aus den ausgeführten Untersuchungen mit Bestimmtheit hervorgehn dürfte, ist, dass *bei feuchten Bodenarten das Wasser mit wesentlich anderen physikalischen Eigenschaften als in gewöhnlichen Fällen auftritt.*

Ferner: dass *die beträchtliche Steigerung der inneren Wärmeleitungsfähigkeit der Hauptsache nach auf Rechnung der veränderten Eigenschaften des Wassers in molekular-kapillarer Hinsicht zu setzen sein dürfte.*

6. Die Eigenschaften feuchter Bodenarten in anderen Hinsichten.

Wie der eigentümliche Apparat wirkt, der die soeben qualitativ nachgewiesenen eigenartigen Verhältnisse der Wärmeleitungsfähigkeit, des spez. Gewichts und der spez. Wärme feuchter Bodenarten erklären soll, darüber lässt sich bei dem gegenwärtigen Stande der Forschung auf diesem Gebiete unmöglich mit Sicherheit etwas sagen; allzu wenig Untersuchungen sind darüber angestellt worden. Doch sei hier etwas über Arbeiten gesagt, welche feuchte Bodenarten oder pulverförmige Körper in anderen physikalischen Hinsichten, als die vorliegenden es sind, behandeln, mit meinen Untersuchungen aber gewisse Berührungspunkte haben.

Van Bemmelen[1] hat den Druck des gesättigten Wasserdampfs bei kolloidalen Lösungen (Gelen) bei verschiedenem Wassergehalt untersucht, um zu entscheiden, ob das Wasser chemisch gebunden oder absorbiert sei. Seine Dampfdruckkurven zeigten bei einem gewissen Feuchtigkeitsgrad ein typisches Knie, das von v. B. als ein Umschlag aufgefasst wurde, bei welchem Punkt eine weiter getriebene Austrocknung keine Volumzusammenziehung mehr bei dem Präparat hervorrief.

Es wäre äusserst wertvoll gewesen, wenn v. B. diese Untersuchung auch auf feuchte pulverförmige Körper (Bodenarten) ausgedehnt hätte, eine Untersuchung, die also noch ihrer Erledigung harrt.

Die Erklärung für diesen Umschlag ist von Zsigmondy[2] gegeben worden, der sich zwar auf kapillare Kräfte beruft, aber die Wirkung des molekular-kapillaren "Druckes" ganz übersehen zu haben scheint.

Lunelund[3] hat den elektrischen Leitungswiderstand für verschiedene Feuchtigkeitsgrade bei einigen pulverisierten Gesteinen untersucht, wie Bimsstein, Glimmer, Granit, Feldspat, Quarz, sowie einigen organischen Pulvern. Seine Untersuchungen wurden leider nicht bis auf völligen Sättigungszustand ausgedehnt. Alle seine

[1] Van Bemmelen, Die Absorption, Dresden 1910, S. 196.
[2] Zsigmondy, Kolloidchemie, Leipzig 1912, S. 148—164.
[3] H. Lunelund, Öfvers. af Finska Vet.-Soc.'s Förhandl. LVI. 1913—14. A. 1.

Resultate zeigen nur ein rasches Sinken des spezifischen Leitungswiderstandes bei vermehrtem Feuchtigkeitsgehalt. Angaben über die Korngrösse fehlen vollständig.

Schliesslich sei hier etwas näher noch auf eine Arbeit von S. Johansson[1] eingegangen, der die Festigkeit von Bodenarten bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt untersucht hat. Als Material verwendete er humusfreie Bodenarten verschiedener Arten, wovon drei mit dem bei meinen Untersuchungen zur Verwendung gekommenen Material teils identisch sind, teils (in einem Falle) ihm sehr nahe stehen.

Diese drei Bodenarten sind 107 Sandbäck, 117 Kosta und die nahestehende 121 Svedala (während ich 123 Svedala untersucht habe).

Die physikalische Methode, deren J. sich bedient hat, hat bereits eine scharfe Kritik erfahren, weshalb ich sie keiner erneuten Prüfung unterziehe; ich weise hier nur darauf hin, um die Unsicherheit seiner graphischen Ergebnisse zu betonen. Diese bestehen aus Festigkeitskurven, mit der, ziemlich willkürlich physikalisch definierten, Festigkeit als Ordinate und dem auf dieselbe Weise wie oben definierten Feuchtigkeitsgrade φ als Abszisse. Johansson glaubt aus den erhaltenen Daten durchgehends das Vorhandensein eines Knies in den Kurven erschliessen zu können, bevor der Wassergehalt die Fliessgrenze erreicht hat. Um diesen Umschlag im Festigkeitsverlauf konzentriert sich das ganze Interesse und die Absicht der Untersuchung, und von diesem Gesichtspunkt aus zieht der Verfasser Zsigmondy's Erklärung des van Bemmelen'schen Umschlagspunktes heran und überträgt sie ohne weiteres auf seine Bodenarten.

Der Umschlagspunkt wird demnach als derjenige Feuchtigkeitsgrad definiert, bei dem die Poren in einem pulverförmigen Stoff eben mit Wasser angefüllt sind. Bei höherem Feuchtigkeitsgehalt steigt das Volumen des Präparats mehr und mehr, bei verminderter Feuchtigkeit verändert es sich nicht, weshalb dieser Punkt auch Schrumpfungsgrenze genannt wird.

Die Frage nach dem Verhältnis des so definierten Umschlagspunktes zur Festigkeit diskutiert der Verfasser ausführlich. Ferner kommt er zu dem Schluss, dass das wirkliche Porenvolumen bei Bodenarten aus der Lage des Umschlagspunktes erhalten wird.

Eigentümlich ist es da, dass der Verfasser nicht daran gedacht hat, dass seine Definition des Umschlagspunktes mit dieser über-

[1] Simon Johansson, Die Festigkeit der Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt. Inaug.-Diss. Upsala 1914 (Sonderabdr. aus Sv. Geol. Unders. Årsbok 7, 1913).

einstimmt: Feuchtigkeitsgrad beim Maximum des spez. Gewichts des angefeuchteten Pulvers. Denn bei der einfachen Auffassung des Verfassers (oder ZSIGMONDY's) von dem physikalischen Verhältnis bei einer angefeuchteten Bodenart müssen ja diese Definitionen einander decken. Ganz einfach dadurch also, dass man das spez. Gewicht feuchter Bodenarten untersucht — und dies lässt sich ja äusserst genau ausführen — sollten sowohl der Umschlagspunkt als auch das Porenvolumen bestimmt und die Festigkeitskurven kontrolliert werden können.

In Anbetracht der äusserst komplizierten Verhältnisse, die bei einer feuchten Bodenart herrschen, und die noch in mehreren physikalischen und chemischen Hinsichten nicht zur Genüge studiert worden sind, bin ich genötigt, das Vorhandensein eines Umschlagspunktes *in dem Sinne*, wie JOHANSSON in seiner ebenerwähnten Arbeit ihn genommen hat, zu bezweifeln. Die oben behandelten molekularkapillaren "Druck"verhältnisse, die in einem feuchten pulverförmigen Stoff herrschen, scheinen JOHANSSON vollständig unbekannt zu sein. Ich fasse meine Kritik in folgenden Behauptungen zusammen:

1) Die wahrscheinlichen physikalischen Prozesse bei einer feuchten Bodenart gehen bei langsamer Variation des Feuchtigkeitsgehaltes sukzessiv in einander über und liefern keine Stütze für die Annahme eines Umschlags*punktes*, entsprechend einem Zustand, wo das Porenvolumen eben von Wasser ausgefüllt ist. Auch braucht eine solche Variation nicht zu einem *Umschlag* in der mechanischen Festigkeit der Bodenart zu führen. Diese hängt von vielen verschiedenartigen, noch allzu wenig studierten Faktoren ab, von denen ein sehr wichtiger im Vorstehenden einer Behandlung unterzogen worden ist. JOHANSSON weist auch selbst darauf hin, dass das Porenvolumen in einem gewissen Zusammenhange mit der Korngrösse steht, demselben nämlich, wie er oben dargelegt worden ist. Es ist da ganz unerklärlich, dass der "Umschlagspunkt" bei den schwersten Tonen bei einem so niedrigen Feuchtigkeitsgrad erhalten worden ist, wie J. ihn gefunden hat (etwa 15 %, bei 121 Svedala etwa 13,5 %). Bei der nahestehenden Probe 123 Svedala habe ich das Maximum des spez. Gewichts bei q gleich ca. 50 % gefunden, welche beiden Werte sich unmöglich vereinen lassen. Es ist möglich, ja, wahrscheinlich, dass mein Wert von q höher als der an der Schrumpfungsgrenze ist, aber zwischen diesem Wert und 15 % oder weniger ist die Kluft doch allzu gross.

2) JOHANSSON's "Umschlagspunkt" trifft bei steigendem Feuch-

tigkeitsgehalt *vor* dem von ihm definierten ein und entspricht wahrscheinlich einem grösseren oder kleineren *Gebiet*, das mit der Schrumpfungsgrenze endet; in diesem Gebiet dürfte sich noch in den Poren mehr oder weniger Luft finden, deren vollständiges Verschwinden erst das Erreichen der Fliessgrenze andeutet. [Das Gebiet zwischen der "Ausrollgrenze" (siehe ATTERBERG, a. a. O., S. 37), die etwas höher als die Schrumpfungsgrenze liegt, und der Fliessgrenze, wird das plastische Gebiet oder kürzer die Plastizität genannt.]

3) Die Festigkeit, besonders bei sandigen Bodenarten, ist nicht bedingt durch die Kompaktheit der Probe (die Poren mit Wasser angefüllt), sondern durch molekulare Adhäsionskräfte. Hierher gehört auch die Zementierungswirkung, die wohl hauptsächlich von chemischen Faktoren herrührt und übrigens ihrer Natur nach sehr wenig bekannt ist.

Der einzige Feuchtigkeitszustand, der mit Recht als ein wirklicher Grenzzustand bezeichnet werden könnte, ist meines Erachtens die Fliessgrenze.

Zwischen der Schrumpfungsgrenze oder vielleicht der Ausrollgrenze und der Fliessgrenze, d. h. innerhalb des plastischen Gebiets, haben wir den oben bestimmten Feuchtigkeitsgrad mit maximaler Wärmeleitungsfähigkeit und maximalem spez. Gewicht zu suchen.

7. Schlussfolgerungen.

Die Schwierigkeit, bei unserer gegenwärtigen Kenntnis von den Verhältnissen und Eigenschaften feuchter pulverförmiger Stoffe die vorliegenden Phänomene zu erklären, ist oben in Punkt 5 und 6 deutlich dargelegt worden. Es bedarf noch vieler Arbeit auf diesem und benachbarten Gebieten, bevor bestimmte Schlüsse werden gezogen werden können.

Was meine eigenen Resultate betrifft, so bin ich in den vorhergehenden Abschnitten Schritt für Schritt von experimentellen Werten und einigen theoretischen, zuvor bekannten Voraussetzungen zu immer spezielleren Schlussfolgerungen fortgeschritten und habe zu zeigen versucht, dass die Ursache der starken Steigerung der Wärmeleitungsfähigkeit mit vermehrtem Wassergehalt in den wesentlich veränderten Eigenschaften des Porenwassers liegen muss. Ich gehe nun weiter und behaupte, dass *aller Wahrscheinlichkeit nach das Porenwasser bei dem viele 1000 Atmosphären betragenden molekular-kapillaren "Druck" eine bedeutend höhere Wärme-*

leitungsfähigkeit als gewöhnliches Wasser erhalten dürfte, gleichzeitig damit, dass es vielleicht den mechanischen Kontakt zwischen den Körnern selbst besser vermittelt.

Die Bedingungen für die Maxima der Wärmeleitungsfähigkeit können auch allgemein in folgenden Punkten formuliert werden:

1) guter mechanischer Kontakt zwischen den Körnern,
2) höchster molekular-kapillarer "Druck",
3) geringste Quantität Porenluft.

Da das die Poren mehr oder weniger vollständig ausfüllende Wasser (unter dem Dichtigkeitsmaximum) so wesentlich verschiedene Eigenschaften in molekularer Hinsicht zeigt, könnte man sich stark versucht fühlen, diesen Zustand, der vollkommen stabil ist, die ganze Masse oder den wesentlichsten Teil derselben betrifft und weder zu dem festen noch zu dem flüssigen oder gasförmigen gerechnet werden kann, *als einen ganz speziellen Aggregatzustand, den zähen oder porenverdichteten, zu klassifizieren.*

* * *

Zum Schlusse möchte ich darauf hinweisen, dass, wenn man in diese komplizierten Probleme eindringen will, man auf gewöhnliche Weise die Anzahl der Variabeln vermindern, d. h. das Problem in gewissen Richtungen zu vereinfachen suchen muss.

KARSTEN hat in dieser Hinsicht unzweifelhaft den richtigen Weg beschritten, wenn er die Wärmeleitungsfähigkeit bei gleichförmigen Schrotkörnern, Glaskugeln und gröberen Sandsortierungen untersuchte und den Durchmesser variieren liess. Die Untersuchungen werden zweckmässigerweise diesen Weg weiter zu verfolgen haben, wobei man aber, statt direkt zu den sowohl in physikalischer als auch in chemischer und geologischer Hinsicht allzu komplizierten natürlichen Bodenarten überzugehn, besser zunächst mit Sortierungen feinerer Sandarten, Tone usw. bis herab zu kolloidalen Lösungen fortfahren wird. Hat man eine bestimmte Sortierung, d. h. eine so weit als möglich gleichartige Korngrösse, so besteht die Möglichkeit, an der Hand leicht bestimmbaren geometrischer Verhältnisse sowie durch Studien der Dichte, Benetzungswärme, spez. Wärme, der Volumvergrösserung oder Schrumpfung, der Dampfspannung, der inneren Wärmeleitungsfähigkeit usw. die molekularen (kapillaren) Adhäsionskräfte und ihre Funktion, den molekularen "Druck", zu erforschen, welche Untersuchungen gleichzeitig, wie auch LAGER-

GREN bemerkt, einen neuen Beitrag zur Beantwortung der für das Studium der Materie interessanten Frage nach dem Radius der molekularen Wirkungssphäre sowie auch den Gesetzen der molekularen Attraktion liefern werden.

Zusammenfassung.

Die Ergebnisse der vorstehenden Untersuchung lassen sich in folgenden Sätzen zusammenfassen:

1) Wärmeleitungsversuche sind mittelst H. F. WEBER's Methode innerhalb eines und desselben Temperaturgebiets (Mitteltemperatur 1°.6) an sieben verschiedenen Bodenarten mit durchschnittlich fünf verschiedenen Feuchtigkeitsgraden angestellt worden, und die Resultate haben die von KARSTEN zuerst deutlich nachgewiesene starke Steigerung der Wärmeleitung bei steigendem Feuchtigkeitsgrad bestätigt.

2) Als Nebenresultate sind die Werte der spez. Wärme für die betreffenden Bodenarten bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt erhalten und ferner festgestellt worden, dass diese von den nach der Mischungsformel berechneten in gesetzmässiger Weise abzuweichen tendieren.

3) KARSTEN's Resultat einer sukzessiven Steigerung der Wärmeleitungsfähigkeit bei höheren Feuchtigkeitsgraden hat, wie zu erwarten, keine Bestätigung erhalten, sondern es ist ein deutliches Maximum erhalten worden, übereinstimmend mit dem Dichtigkeitsmaximum, wonach bei weiterer Steigerung des Wassergehalts die Wärmeleitungsfähigkeit sinkt.

4) Eine Stütze für zuvor über die Wärmeleitungsfähigkeit pulverförmiger Körper aufgestellte Theorien hat die vorliegende Untersuchung nicht liefern können.

5) Die beträchtliche Steigerung der inneren Wärmeleitungsfähigkeit erklärt sich dadurch, dass das Wasser bei dem mehrere 1000 Atmosphären betragenden molekular-kapillaren "Druck" sowohl selbst eine höhere Wärmeleitungsfähigkeit erhält als auch den mechanischen Kontakt zwischen den Körnern besser vermittelt.

6) Als eine wichtige Stütze für diese Ansicht fasse ich die von mir für das spezifisches Gewicht des Porenwassers gefundenen Werte auf.

Das Charakteristische einer *porenverdichteten* Flüssigkeit dürfte auch in anderen physikalischen Beziehungen zum Ausdruck kommen, worüber weitere Untersuchungen wünschenswert wären.

Bezeichnungen.

Alle Einheiten und Grössen sind in C. G. S.-System, d. h. in cm, g, (cal), sec und grad C. angegegeben.

A B C Konstanten.
F Basisfläche der oberen Kupferplatte (dieselbe wie bei der unteren).
F_1 „ + Zylindermantelfläche der oberen Kupferplatte.
M Gewicht der (feuchten) Probe.
M_1 „ „ oberen Kupferplatte.
M Modul der Briggschen Logarithmen = 0,43429.
$N = \frac{1+\xi}{2} \cdot \frac{\eta^2}{2\xi}$.
O Gesamtoberfläche des Kalorimeters.
$P = \Delta_1 \cdot \varrho_1 \cdot c_1$.
R Radius der Kupferplatten.
T Anfangstemperatur der oberen Kupferplatte.
$U_1 = A_1 \cdot e^{-\frac{k}{\varrho \cdot c} \cdot q_1^2 \cdot Z}$.
V Volumen zwischen den Kupferplatten.
Z Zeitraum vom Zeitpunkt des Niedersetzens des Apparats auf das Eis bis zur 1. Beobachtung.
c spezifische Wärme des Bodenpräparats.
c_φ „ „ „ „ beim Feuchtigkeitsgrad φ.
c_1 „ „ der oberen Kupferplatte.
c' „ „ des Bodenkalorimeters.
f Volumenkorrektion (= Volumen des wirksamen Gummiisolierbandes).
g Gewichts-korr. (= Gewicht der drei kleinen Glasstützen).
h *äussere* Wärmeleitungsfähigkeit (NEWTON) der Bodenlamelle (des Wassers).
h_1 äussere Wärmeleitungsfähigkeit der oberen Kupferplatte.
h_r Wärmeverlust infolge der Verdunstung vom Rande der Lamelle her pro cm^2 usw.
k innere Wärmeleitungsfähigkeit (Endwert).
k' „ „ (Näherungswert).
k_1 „ „ der oberen Kupferplatte.
l natürlicher Logarithmus (= log. nat.).
lg Briggscher Logarithmus.
m Gewicht der Bodenprobe im Bodenkalorimeter.
m_w „ des Wassers „ „
m' Gewicht des Bodenkalorimeters.

n Siehe die Tabellen 3 und 4!

o Wärmeverlust durch den Glasring bei 1° Temperaturdifferenz.

$p = \frac{1}{n\tau_0 \mathbf{M}}$ [bei k-Versuch = 0,038377; lg p = 0,58407 — 2].

$q_1 = q = \frac{\eta}{l}$.

$q' = \frac{\eta'}{\Delta}$.

r Radius (Veränderliche).

s spez. Gewicht der Bodenpartikeln.

t Temperatur.

u Korrektion in Vol.-% von F für Ausbuchtung bzw. Einbuchtung.

w Volumen der Bodenpartikeln.

x y z v (Winkel), unabhängige Veränderliche.

a Galvanometerausschlag in cm.

β eine Konstante $= \frac{h_1 \cdot F_1}{F \cdot \varrho_1 \cdot c_1 \cdot \Delta_1}$.

$\delta = \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$.

Δ Dicke der (Boden)lamelle.

Δ_1 Dicke der oberen Kupferplatte (Index 2 derselbe für die untere Platte).

ε Wasserwert der Luft im Kalorimeter = 0,11.

$\eta = q \cdot \Delta = 1$. Wurzel der Gleichung: $\eta \cdot \operatorname{tg} \eta = \xi$.

$\eta' = q' \cdot \Delta =$ „ „ „ „ $\eta' \cdot \operatorname{tg} \eta' = \xi'$.

$\vartheta = \mu \cdot \Delta \cdot \Delta_1 \cdot \varrho_1 c_1$.

$\varkappa = \beta \frac{\varrho \cdot c}{k^2 \cdot q^2}$.

$\mu = \lg a_i - \lg a_{n+i}$ (bei k-Serien).

$\mu_c =$ „ „ (bei c-Serien mit Bodenart).

$\mu_0 =$ „ „ (bei c-Serien mit Luft).

$\mu_w =$ „ „ (bei c-Serien mit Wasser).

ν Gewichtskorr. (= Gew. des wirksamen Gummiisolierbandes).

$\xi = \xi' \frac{1}{1 - \varkappa}$.

$\xi' = \frac{\Delta \cdot \varrho \cdot c}{\Delta_1 \cdot \varrho_1 \cdot c_1} = \frac{\Delta \cdot \varrho \cdot c}{P}$.

ϱ spez. Gewicht des Bodenpräparats.

ϱ_1 „ „ der oberen Kupferplatte.

τ Zeit.

τ_0 Zeitintervall zwischen zwei auf einander folgenden Ablesungen.

φ Feuchtigkeitsgrad in %; φ_0 φ_1 φ_2 φ_3 φ_4 φ_∞ (steigender Feucht.-gehalt).

$\chi = p \varrho c \mu$.

Ω Ohm.